

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

**Pneumatické proporcionální řízení – druhy, prvky, ověření  
vlastností experimentem**

**Pneumatic Proportional Control – Types, Components,  
Experimental Properties Testing**

Student: Bc. Jiří Wantulok  
Vedoucí diplomové práce: Ing. Miloslav Žáček

Ostrava 2012

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jiří Wantulok**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství

Specializace: 16 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení

Téma: Pneumatické proporcionální řízení - druhy, prvky, ověření vlastností experimentem  
Pneumatic Proportional Control – Types, Components, Experimental Properties Testing

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte přehled prvků a druhů proporcionálního řízení používaných v pneumatice.
2. Vypracujte pneumatická obvodová a elektrická schémata pro zapojení různých druhů proporcionálního řízení.
3. Zpracujte model v Matlab – Simulinku rozšířeném o Real Time Toolbox pro řízení pneumatického servopohonu a elektropneumatického tlakového ventilu.
4. V laboratoři pneumatických mechanismů otestujte vlastnosti proporcionálního rozváděče fy Festo typ MPYE-5 a elektropneumatického regulátoru tlaku s proporcionálním magnetem fy Rexroth Mecman Pneumatik typ 561 012.

Seznam doporučené odborné literatury:

SCHMID, D. *Řízení a regulace pro strojírenství a mechatroniku*. Praha: Europa-Sobotáles cz. 2005. 420 s. ISBN 80-86706-10-9.  
SMC Industrial Automation CZ. Brno. *SMC Training. Stlačený vzduch a jeho využití*. 2007.  
FESTO Esslingen *Bedienungsanleitung Elektronisches Proportional-Wege-Ventil Typ MPYE-5*  
REXROTH Mecman GmbH Hannover *Know-how in Pneumatik*. Katalog. 1491 s.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Miloslav Žáček**

Konzultant diplomové práce: Ing. Lukáš Dvořák, Ph.D.

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012



  
prof. RNDr. Milada Kozubková, CSc.  
vedoucí katedry

  
prof. Ing. Radim Farana, CSc.  
děkan fakulty

### **Místopřísežné prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 21. 5. 2012

*Wanabuloh Jirsa*.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB – TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB – TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 21.5.2012



podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Jiří Wantulok

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Staré Město 730  
739 61 Třinec

## **ANOTACE DIPLOVÉ PRÁCE**

Wantulok, J. *Pneumatické proporcionální řízení – druhy, prvky, ověření vlastností experimentem : Diplomová práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2012, 71 s. Vedoucí práce: Žáček, Miloslav.

Diplomová práce se zabývá proporcionálním řízením používaným v pneumatice. V první řadě je zpracován všeobecný přehled prvků a druhů proporcionálního řízení a srovnán s řízením klasickými prvky. V následující kapitole jsou uvedeny některé příklady použití proporcionálního řízení v pneumatice. Kapitola č. 5 je zaměřena na přípravu jednotlivých prvků pneumatického obvodu a jejich následné ladění. V následující kapitole je sestaven pneumatické schéma obvodu a také sestavený model v Matlab – Simulink. Následně jsou provedeny 3 měření, které jsou zpracovány v Microsoft Office Excel. V závěru této diplomové práce jsou zhodnocené jednotlivá měření. Výsledky jednotlivých měření jsou znázorněny v příloze v podobě různých kombinací grafů.

## **ANNOTATION OF MASTER THESIS**

Wantulok, J. *Pneumatic Proportional Control – Types, Components. Experimental Properties Testing : Master Thesis*. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydromechanics and Hydraulics Equipment, 2012, 71 p. Thesis head: Žáček, Miloslav.

This diploma thesis describes proportional control of pneumatic's systems. The thesis presents the summary of elements and types of proportional driving systems and comparison with classic control solutions. Subsequently, examples of use of proportional control in the pneumatic systems are presented. Chapter five describes preparation of elements in pneumatic circuit assembly. Next chapter describes simulation of pneumatic circuit as a Matlab – Simulink model. After this part the measurements of the systems are presented and analysed Microsoft Office Excel software. In the concluding part of this diploma thesis, I present an evaluation of measurement.. The results of these measurements are shown in the attached graphs.

Použité veličiny a jednotky .....	- 7 -
Úvod.....	- 8 -
1. Základní pojmy proporcionálního řízení .....	- 9 -
1.1 Důležité pojmy v regulační technice .....	- 12 -
1.2 Požadavky na průběh regulačního pochodu .....	- 14 -
2. Pneumatické proporcionální řízení .....	- 17 -
2.1 Princip funkce tryska/klapka .....	- 17 -
2.2 Pneumatický válec s integrovaným regulátorem polohy .....	- 18 -
3. Elektropneumatické proporcionální řízení.....	- 20 -
3.1 Elektropneumatické proporcionální převodníky .....	- 20 -
3.2 Elektropneumatický převodník pro regulaci tlaku vzduchu .....	- 21 -
3.3 Elektropneumatické převodníky pro regulaci průtoku vzduchu .....	- 29 -
4. Pneumatická obvodová a elektrická schémata.....	- 36 -
5. Příprava prvků pro měření .....	- 39 -
5.1 Prostředí Matlab – Simulink .....	- 39 -
5.2 Snímač tlaku vzduchu .....	- 45 -
5.3 Snímač průtoku vzduchu .....	- 48 -
5.4 Proporcionální regulátor tlaku .....	- 51 -
5.5 Proporcionální rozváděč .....	- 53 -
6. Experiment pneumatických prvků .....	- 57 -
6.1 Propojení prvků.....	- 57 -
6.2 Postup měření .....	- 58 -
6.2.1 Měření č. 1 .....	- 60 -
6.2.2 Měření č. 2.....	- 64 -
6.2.3 Měření č. 3 .....	- 65 -
7. Závěr .....	- 66 -
8. Použitá literatura .....	- 68 -
9. Seznam příloh .....	- 71 -

## Použité veličiny a jednotky

<u>Značka:</u>	<u>Název:</u>	<u>Rozměr:</u>
$d$	průměr	[m]
F	síla	[N]
f	frekvence	[Hz]
$G$	rozměr trubkového závitu	[inch]
I	proud	[A]
$p$	tlak	[Pa]
$Q_N$	průtok za normálních podmínek	[m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> ]
R	odpor	[Ω]
U	napětí	[V]

## Úvod

Stlačený vzduch má své pevné místo v použití pro pohony, řízení a regulaci. Stlačený vzduch je stále více používán a je neodmyslitelnou součástí řady manipulátorů a dalších mechanismů. Řada pneumatických aplikací vyžaduje rychlé a přesné řízení polohy lineárních pneumatických válců nebo vyžaduje rychlý pohyb s vysokou frekvencí. Pro tyto příklady použití se používají různé druhy proporcionálního řízení. Moderní proporcionální prvky ve spojení s různými druhy snímačů např. snímače polohy či otáček, je docílená vysoká spolehlivost a přesnost regulace.

Tato diplomová práce se zabývá proporcionálním řízením používaných v pneumatice. Aby bylo možné používat proporcionální prvky v různých pneumatických obvodech je zapotřebí znát různé druhy a vlastnosti proporcionálních prvků. Proto bude zpracován přehled různých druhů proporcionálních prvků používaných v pneumatice. Také budou zpracovány pneumatická obvodová a elektrická schémata pro zapojení různých druhů proporcionálního řízení.

V laboratoři pneumatických mechanismů bude sestaven elektropneumatický obvod pro testování různých vlastností proporcionálního rozváděče fy FESTO MPYE – 5 a elektropneumatického regulátoru tlaku s proporcionálním magnetem fy Rexroth Mecman pneumatik typ 561 012. Veškerá měření budou provedena v laboratoři pneumatických mechanismů na VŠB – TU Ostrava.

Tyto proporcionální pneumatické prvky budou ovládány pomocí softwarového vybavení Matlab – Simulink ve kterém bude zpracován model. Model v Matlab – Simulinku rozšířeném o Real Time Toolbox bude řídit jak proporcionální rozváděč MPYE – 5 tak elektropneumatický regulátor tlaku s proporcionálním magnetem typ 561 012. Výsledky měření budou vyhodnoceny v Microsoft Office Excel.



## 1. Základní pojmy proporcionálního řízení

Mimo řízení technologických procesů binárními – dvojkovými signály (0/1) umožňují proporcionální technická zařízení řízení analogovými signály. Tato zařízení dovolují rychlou a plynulou změnu tlaku, nebo objemu při řízení technologického procesu. Již dlouho se používají klasické regulační systémy pro regulaci tlaku a množství (objemu) vzduchu a plynů. Řadu hydraulických obvodů si již nejde představit bez proporcionálních ventilů pro řízení množství protékajícího oleje a tím i rychlosti pohybu pístnice hydraulického válce.

V pneumatických obvodech se proporcionální technika začala v širším měřítku uplatňovat od počátku osmdesátých let. Proporcionálně řízená pneumatická zařízení se používají v řadě přístrojů a zařízení určených pro zdravotnictví, pro měřicí a kontrolní přístroje, pro lakování a jiné povrchové úpravy. Dále pro chemický a petrochemický průmysl, tepelné elektrárny, teplárny, potravinářství a řadu jiných oborů. Jejich použití rozdělujeme na oblasti:

### **Pro řízení technologických procesů:**

Pro spojitou regulaci – tlaku, množství, teploty, hladiny

Pro ovládání – kulových kohoutů, klapek, ventilů

### **Pro ovládání pohonů:**

Pro spojitou regulaci – rychlosti pohybu

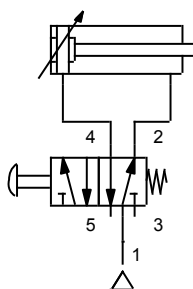
Tlaku jako technologické funkce

Pro pochopení chování proporcionálního pneumatického řízení v této kapitole uvedu některé základní pojmy z techniky řízení a regulace. Každý systém je buď řízen, nebo regulován. Regulace je proces, který udržuje (stabilizuje) nějakou fyzikální veličinu v blízkosti požadované hodnoty, tj. stabilizuje regulovanou veličinu průběžně na hodnotě blízké hodnotě řídicí veličiny. Tuto hodnotu udržuje i při působení rušivých vlivů. [6]

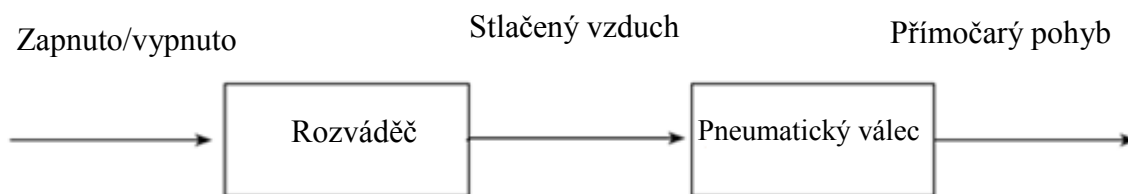
## **Řízení – ovládání**

Jako příklad uvedu řízení přímočarého pneumatického válce obr. 1-1, jehož poloha se řídí pomocí mechanického rozváděče (5/2). Pneumatickým válcem je možno dosáhnout

pouze dvou základních poloh, které odpovídají buď plnému vysunutí pístnice, nebo jejímu plnému zasunutí. Dosažení poloh, které odpovídají hodnotám mezi těmito krajními polohami, je s prvky pro řízení – ovládání velmi těžko proveditelné. [6]



Obr. 1-1 Schéma ovládání 5/2 tlačítkovým rozváděčem



Obr. 1-2 Řízení – ovládání pneumického válce

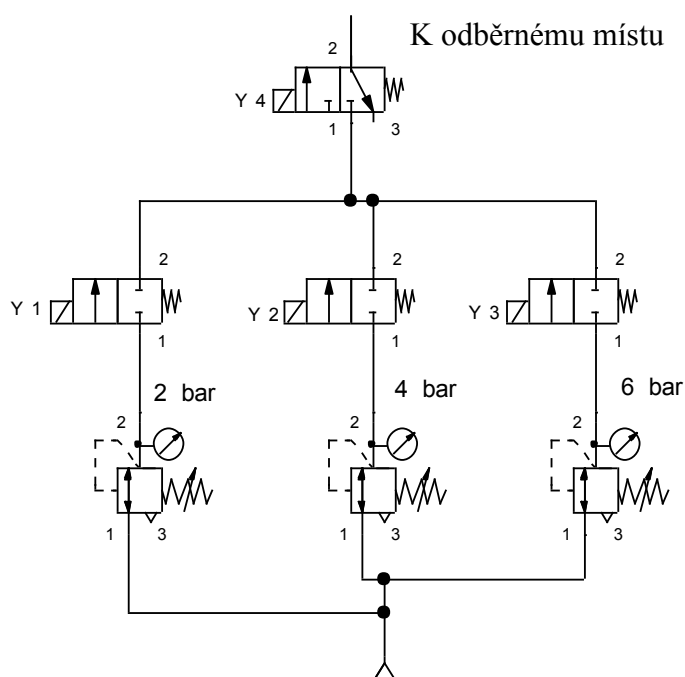
Charakteristickými znaky řízení – ovládání jsou: Obvod je ovlivňován řídicími signály. Řízení je charakterizováno jednosměrností řídicích signálů, které nejsou korigovány. Obvod je otevřený a neexistuje zpětná vazba, výstupní veličina není odměřována a kontrolována. Neexistuje možnost porovnání zadané a skutečné veličiny. Značná výhoda v řízení – ovládání je, že řízený systém je velice účinný a rychlý, ale neexistuje možnost kompenzace působení neznámých poruch a poruch způsobených kolísáním hodnot vstupních parametrů.

## Regulace

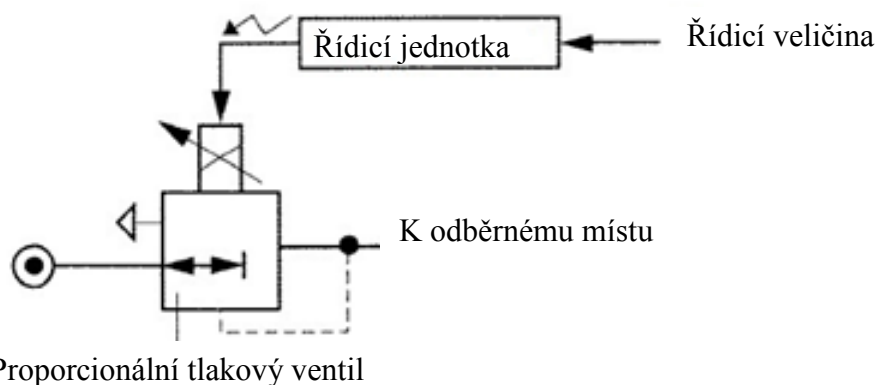
Je proces, který udržuje nějakou fyzikální veličinu na požadované hodnotě, resp. v požadovaných mezích a udržení této hodnoty i při působení rušivých vlivů (např. teplota, tlak, rychlost, apod.). Regulace probíhá v uzavřené smyčce tvořené nastavovacím řetězcem a zpětnou vazbou regulované veličiny. Že je zpětná vazba záporná znamená, že pokud se výstupní veličina zvětší, zpětná vazba ji zmenší zpět na požadovanou hodnotu a opačně. Regulovaná veličina je během procesu průběžně měřena. Průběžně se porovnává hodnota zadané veličiny s naměřenou veličinou. Přínosem regulace je možnost vyrovnání vlivu neznámých poruch a kolísání zadaných parametrů. Při špatném návrhu však může dojít

k problémům se stabilitou regulované veličiny a regulační smyčka může kmitat. Aby nedocházelo ke kmitání v regulační smyčce, musí být zajištěno, aby změna nastavované veličiny neprobíhala příliš rychle. Oproti ovládání je regulace někdy pomalejší a finančně nákladnější, proto musíme pečlivě zvážit, jestli je vhodnější obvod ovládat či regulovat.

Na tomto příkladu je uveden rozdíl mezi klasickým řízením a proporcionálním řízením. Příklad uvádí požadavek na tři různé pracovní tlaky. První schéma obvodu obr. 1 – 3 je sestaveno z klasických prvků redukčních ventilů a rozváděčů. Druhé schéma obr. 1 – 4 znázorňuje proporcionální řízení. Z tohoto příkladu je patrné, že proporcionální řízení obsahuje značný menší počet ovládacích prvků než klasické (konvenční) řízení. Proporcionální řízení také představuje menší náklady na zařízení, příslušenství i montáž.



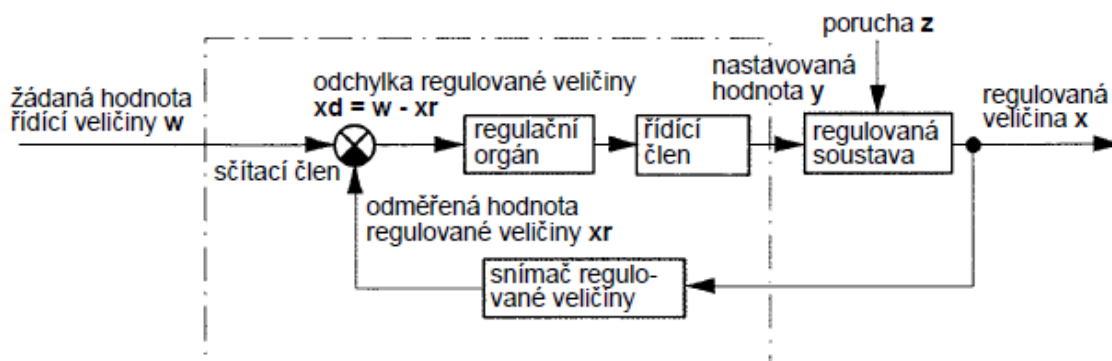
Obr. 1-3. Konvenční řízení nastavení 3 různých pracovních tlaků [5]



Obr. 1-4 Proporcionální řízení různých pracovních tlaků [5]

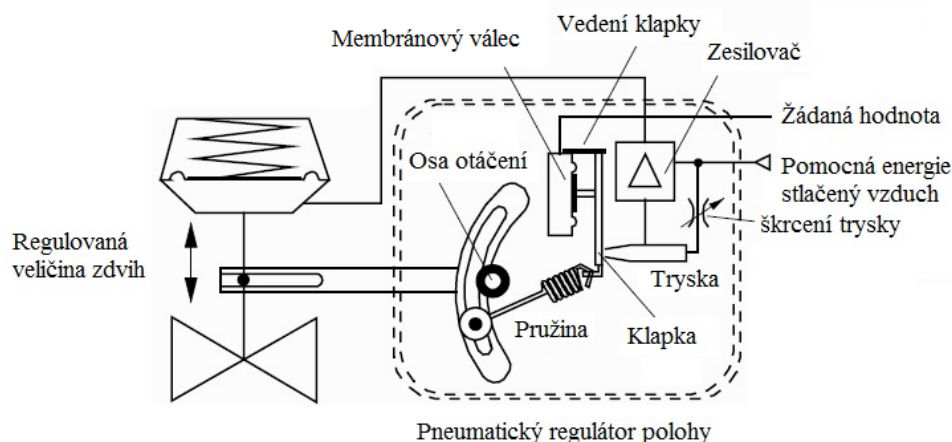
## 1.1 Důležité pojmy v regulační technice

<b>Regulátor –</b>	(-) obsahuje zařízení pro snímání a vyhodnocování regulované veličiny, komparátor, ústřední člen regulátoru, zesilovač, regulační orgán a rozvod.
<b>Řídicí veličina –</b>	(w) řídicímu členu zadaná požadovaná hodnota např. proud, napětí, tlak.
<b>Regulovaná veličina –</b>	(x) ovlivňovaná hodnota dynamického systému např. tlaku teploty, průtoku.
<b>Odměřená hodnota regulované veličiny</b>	(xr) hodnota zpětné vazby.
<b>Regulovaná soustava –</b>	(-) dynamický systém jehož výstupní hodnoty mají být regulovány např. válec, kyvný pohon, klapka.
<b>Sčítací člen –</b>	(-) porovnává zadanou a skutečnou hodnotu.
<b>Odchylka regulované veličiny –</b>	(xd) výstup sčítacího členu $x_d = w - x_r$
<b>Ústřední člen regulátoru –</b>	(-) určuje vstupní hodnotu pro regulátor.
<b>Zesilovač –</b>	(-) generuje výstupní signál y.
<b>Nastavovaná akční veličina –</b>	(y) vstupní signál do regulované soustavy.
<b>Porucha –</b>	(z) veličina, jejíž změna (např. teploty, tlaku, napětí) v průběhu procesu působí na regulovanou soustavu.
<b>Snímač a měřicí člen –</b>	(-) snímá a vyhodnocuje regulovanou veličinu.



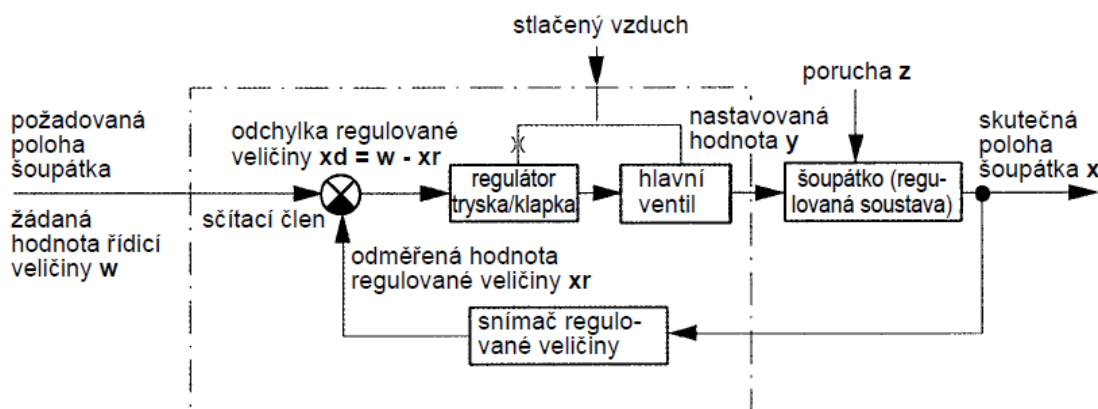
Obr. 1.1-5 Blokové schéma regulačního obvodu

Jako příklad uvedu řízení polohy šoupátka, jehož řízením se reguluje průtok změnou průřezů šoupátka. Zjednodušené schéma regulátoru polohy, který ve spojení s jednočinným membránovým pneumatickým válcem ovládá polohu šoupátka, je na obr. 1.1 - 6. [6]



Obr. 1.1-6 Zjednodušené schéma regulátoru polohy spojené s pohonem a šoupátkem [1]

Blokové schéma regulátoru polohy šoupátka je na obr. 1.1 – 7. Požadovaná hodnota regulované veličiny  $w$  (poloha šoupátka) je zadána do komparátoru elektrickým proudem, napětím nebo tlakem ovládacího média (na tomto příkladě vzduchu). Snímač regulované veličiny vyhodnotí skutečnou polohu šoupátka a této poloze odpovídající signál  $x_r$  přivede do komparátoru, ve kterém se porovná a požadovanou hodnotou  $w$  a jako odchylka regulované veličiny  $x_d$  upraví polohu ovládání regulátoru tryska/klapka. Výstupní signál  $y$  (tlak vzduchu) z hlavního ventilu regulátoru upraví polohu mechanismu (membránového pneumatického válce) a tím také polohu šoupátka. Tím je obvod regulace uzavřen. Také při působení poruchy  $z$ , (tlaku vzduchu) na šoupátkem limitovaný průřez, musí regulační obvod udržet požadovanou hodnotu regulované veličiny  $w$ . Hodnota regulované veličiny  $w$  odpovídá proporcionálně skutečné poloze šoupátka  $x$ . [1]

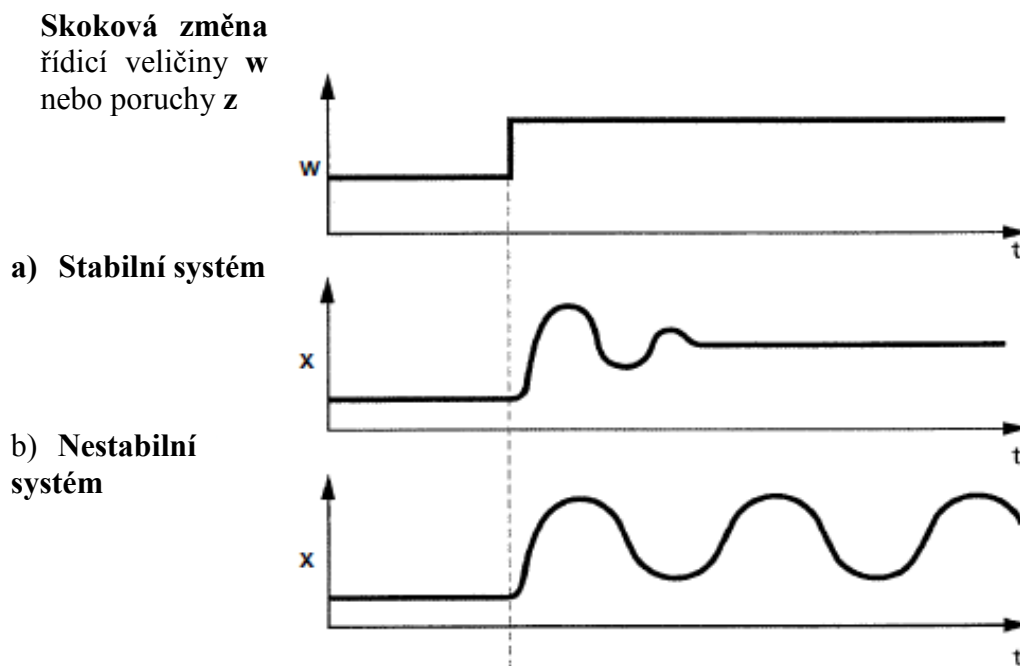


Obr. 1.1-7 Blokové schéma regulačního obvodu šoupátka [6]

## 1.2 Požadavky na průběh regulačního pochodu

### Stabilita:

Stabilita je nejdůležitější vlastností regulačního obvodu. Pokud se regulovaná veličina  $x$  po přivedení skokové změny řídicí veličiny  $w$  na vstupu systému ustálí, pak je systém stabilní. Systém je nestabilní, pokud se regulovaná veličina  $x$  rozkmitá s konstantní nebo rostoucí amplitudou.



Obr. 1.2-8 Stabilita regulačního obvodu

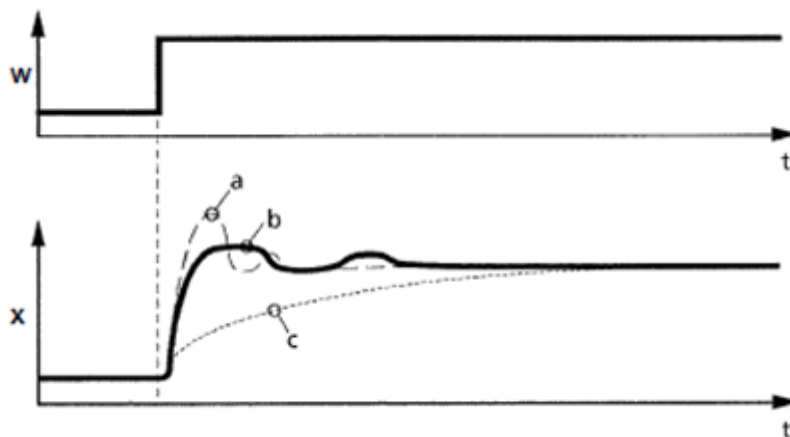
### Statická přesnost:

Je-li hodnota změny řídicí veličiny nebo poruchy konstantní, nesmí dojít v závislosti na čase ke změně regulované veličiny.

### Dostatečné tlumení:

Tlumení ovlivňuje přesnost a dynamiku regulačního pochodu. Velké tlumení brání při skokové změně překročení hodnoty řídicí veličiny, ale prodlužuje čas potřebný pro ustálení. Malé tlumení zkracuje čas potřebný pro ustálení, ale je možná velká odchylka od zadané hodnoty. U nestabilního regulačního pochodu se tyto odchylky neustálí a regulace není možná. [6]

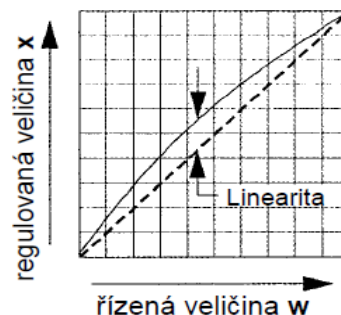
**Skoková změna**  
řídící veličiny  $w$   
nebo poruchy  $z$



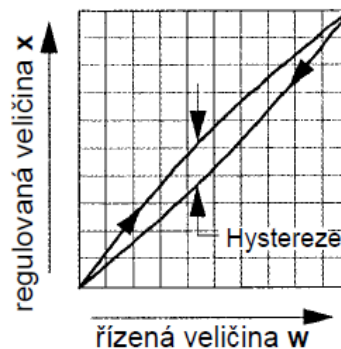
- a. Velké překmitnutí → krátký čas pro ustálení  
(krátká doba regulace)
- b. Malé překmitnutí → dlouhý čas pro ustálení (dlouhá  
doba regulace)
- c. Žádné překmitnutí → velmi dlouhý čas pro ustálení  
(velmi dlouhá doba regulace)

Obr. 1.2-9 Přechodové charakteristika při různém působení tlumení [4]

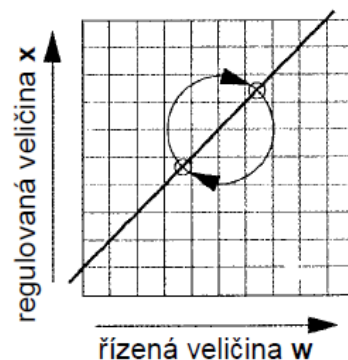
**Linearita:** Vyjadřuje proporcionalní poměr mezi hodnotou řízené veličiny  $w$  a hodnotou regulované veličiny  $x$  maximální odchylka od konečné hodnoty se vyjadřuje v procentech.



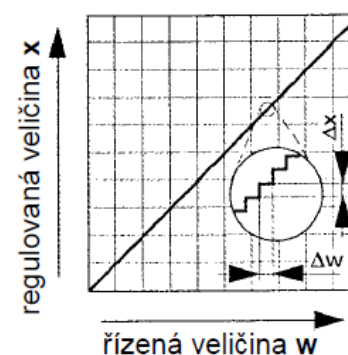
**Hystereze:** Vyjadřuje v procentech rozdíl mezi hodnotou řízené veličiny  $w$  a hodnotou regulované veličiny  $x$  při nastavení regulátoru od nulového bodu na maximum a z maxima na nulový bod. [6]



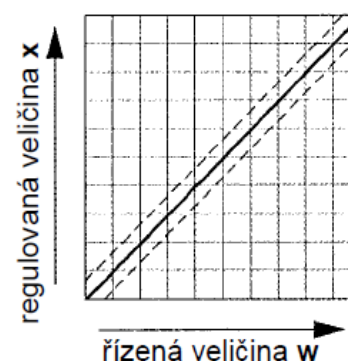
**Opakovatelná přesnost:** vyjadřuje v procentech, s jakou odchylkou od koncového bodu je možno opakovatelně nastavit hodnotu regulované veličiny  $x$ , odpovídající koncovému bodu.



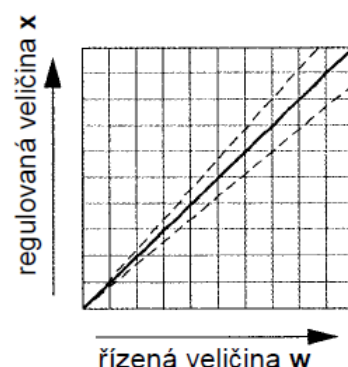
**Citlivost:** udává, při jaké změně hodnoty řízené veličiny  $w$ , nebo změně hodnoty regulované veličiny  $x$  reaguje mechanismus proporcionálního ventilu, nebo regulátoru.



**Nastavení nulového bodu:** umožňuje jeho posunutí do pole kladného i záporného rozsahu. Křivka vyjadřující charakteristiku přístroje, se posouvá rovnoběžně se základní křivkou.



**Nastavení rozsahu regulace:** dovoluje změnit strmost základní charakteristické křivky. Konečná hodnota regulované veličiny  $x$  může být snížena, nebo zvýšena a tak přizpůsobena požadavkům technologického procesu. [6]





## 2. Pneumatické proporcionální řízení

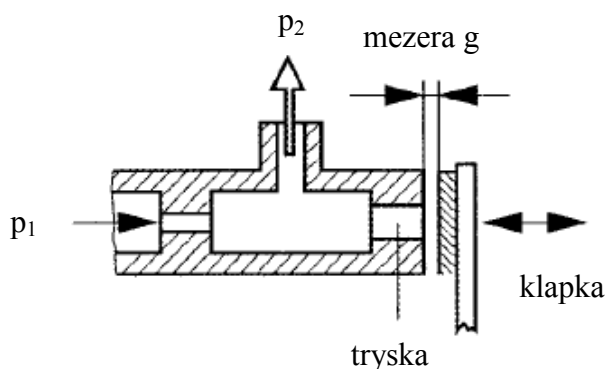
Pneumatické proporcionální řízení se používá např. k regulaci polohy šoupátek, ventilů klapek apod. Regulátor polohy je mechanismus, který umožňuje nastavovat pneumatický válec v požadované poloze a tím např. regulovat šoupátko. Je možné regulovat objemy a tlak plynů. Ústředním členem regulátoru je prvek, který tvoří tryska a klapka. V následující podkapitole je popsána funkce trysky/klapky. [6]

### 2.1 Princip funkce tryska/klapka

Umožňuje řízení pomocí analogového signálu a tím dovoluje rychlou a plynulou změnu tlaku při řízení technologického procesu např. regulátor polohy. Jak je zřejmé z obrázku 2.1 – 1, tlak vzduchu  $p_2$  se mění proporcionálně s velikostí mezery  $g$  mezi tryskou a klapkou. Změna hodnoty řídicí veličiny, v tomto případě tlaku, změní polohu klapky vůči trysce a tím velikost mezery  $g$  mezi tryskou a klapkou. Zvětšení mezery se projeví snížením tlaku  $p_2$ . Pokud není mezi tryskou a klapkou mezera, je vstupní tlak roven výstupnímu ( $p_1 = p_2$ ). Při konstrukci regulátoru polohy je důležité určit optimální rozměr mezery „ $g$ “.

Výstupní tlak  $p_2$  je zapotřebí zesílit tak, že např. kyvný pohon pootočí regulační klapku o určitý úhel. Regulátory, které pracují se systémem tryska/klapka, mají trvalou spotřebu stlačeného vzduchu. Unikající vzduch z trysky se projevuje slyšitelným syčením.

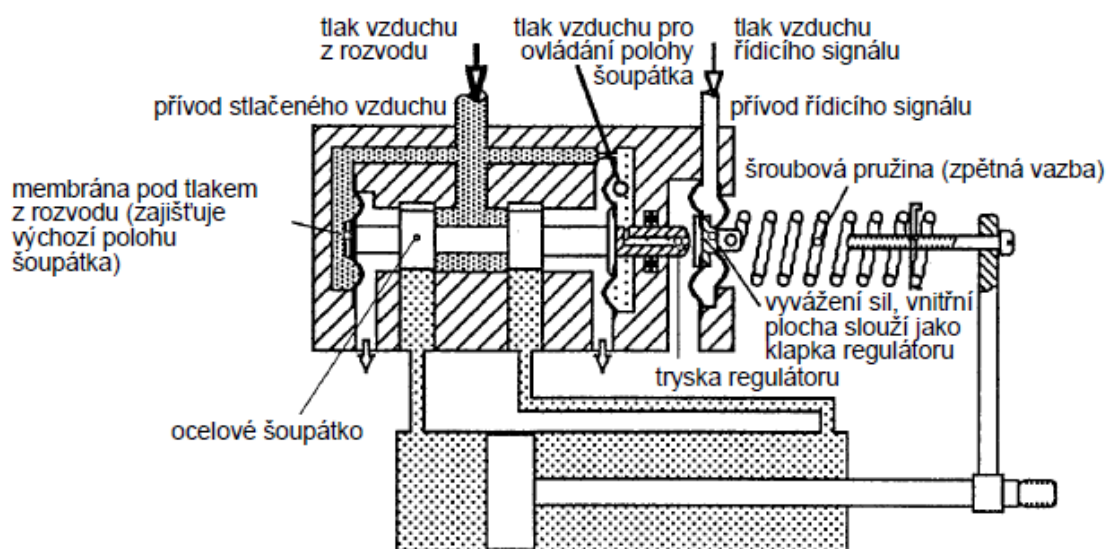
Tyto systémy jsou náročné na čistotu vzduchu, který musí být zbaven nečistot (filtrace do  $5\mu\text{m}$ ) a nesmí obsahovat olej. [6]



Obr. 2.1-1 Princip funkce tryska/klapka

## 2.2 Pneumatický válec s integrovaným regulátorem polohy

Podélný řez na obr. 2.2 – 2 představuje zjednodušený regulátor polohy. Ocelové šoupátko odpovídá provedení s nulovým překrytím (jeho kanály s výstupy k válci jsou uzavřeny pouze hranou šoupátka). Na membránu vlevo působí trvale tlak vzduchu přiváděný z rozvodu do regulátoru polohy, na membránu vpravo působí trvale tlak vzduchu generovaný řídicím signálem. Pístnice válce se nepohybuje, když je šoupátko ve střední poloze (kanály s výstupy k válci jsou uzavřeny) a na obě membrány působí stejný tlak vzduchu.

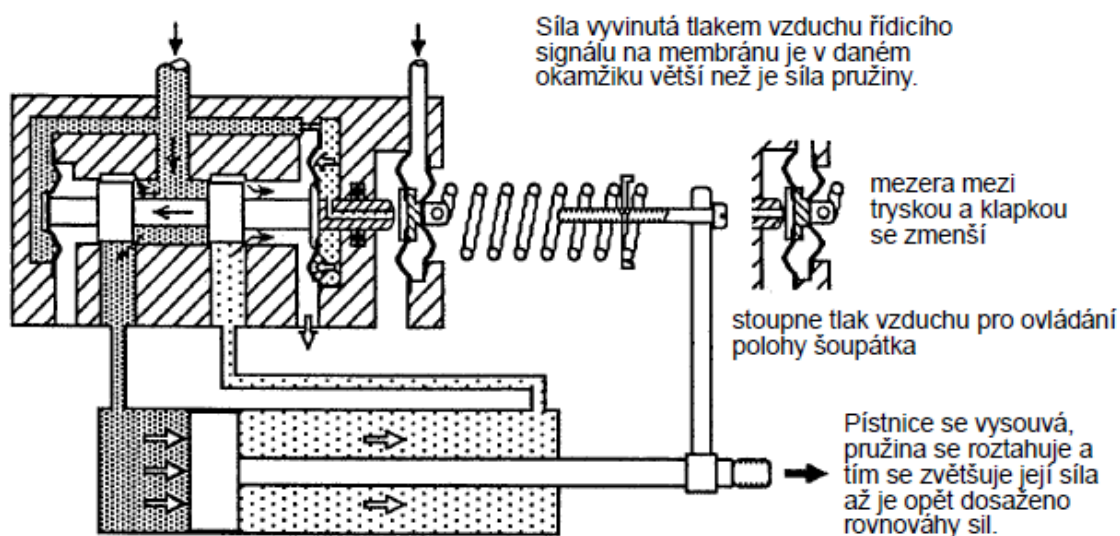


Obr. 2.2-2 Regulátor polohy tryska/klapka pneumatického válce

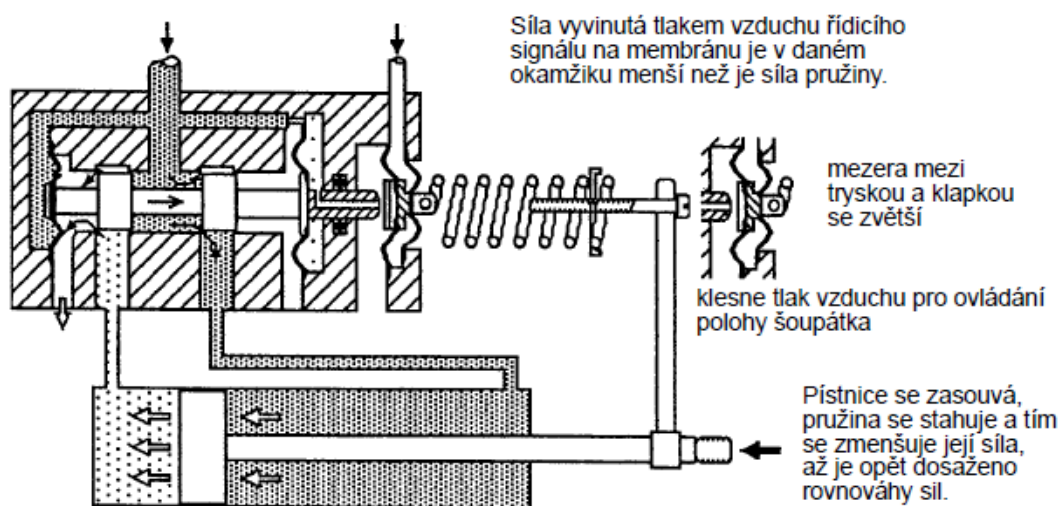
Regulátorem, pracujícím na principu tryska/klapka, se generuje tlak vzduchu pro ovládání polohy šoupátka. Klapku tvoří plocha kotouče, upnutého mezi dvě tvarované membrány a spojeného s pružinou s funkcí zpětné vazby. Vnitřní plocha kotouče spolu se šroubovou pružinou jsou prvky mechanismu k vyvážení síly tlaku vzduchu pro ovládání polohy šoupátka se silou šroubové pružiny.

Zvýšením tlaku vzduchu řídicího signálu se přiblíží klapka k ústí trysky. Tím stoupne tlak vzduchu pro ovládání polohy šoupátka, který působí na membránu vpravo a šoupátko se posune doleva. Posunutím šoupátka se otevřou kanály ventilu k pneumatickému válci a pístnice se začne vysouvat až do doby, kdy síla pružiny oddálí klapku od ústí trysky obr. 2.2 – 3. Tlak pro ovládání polohy šoupátka klesne na hodnotu, která odpovídá rovnováze sil, vyvozených tlakem vzduchu řídicího signálu a silou pružiny. Šoupátko se posune vpravo do výchozí polohy a pohyb pístnice se zastaví do doby, než se zmenší tlak řídicího

signálu, šoupátko se posune doprava obr. 2.2 – 4. Pístnice se začne zasouvat. Pístnice se zastaví, pokud vznikne rovnováha sil vyvozené silou pružiny a tlakem vzduchu řídicího signálu. Šoupátko je ve výchozí poloze do doby, než v kanále změnou řídicího signálu nebo poruchou (změnou polohy pístnice) poruší rovnováha sil, působících na klapku regulátoru polohy. [6]



Obr. 2.2-3 Regulátor polohy po zvýšení řídicího tlaku vzduchu



Obr. 2.2-4 Regulátor polohy po snížení řídicího tlaku vzduchu [6]

### **3. Elektropneumatické proporcionální řízení**

Elektropneumatické proporcionální řízení se používá v celé řadě průmyslových oborů a odvětví např. k regulaci polohy, síly, otáček, rychlosti, množství vzduchu apod. Ústředním členem elektropneumatického proporcionálního řízení jsou elektropneumatické převodníky. Tyto převodníky převádí elektrický signál na výstupní tlak nebo objem protékajícího média. [6]

#### **3.1 Elektropneumatické proporcionální převodníky**

Zařízení, která převádí elektrický signál na vstupu (proud nebo napětí) na výstupu na tlak nebo objem protékajícího média, známe pod názvem elektropneumatické proporcionální rozváděče. Převodníky se dělí na dvě základní skupiny. Buď se reguluje tlak, nebo se reguluje objem protékajícího média. Realizuje se, buď systémem tryska/klapka, ovládacími ventily nebo proporcionálním regulačním elektromagnetem. Prvky proporcionálního řízení obsahují velice přesné ventilové řízení nebo trysky malého průřezu řádově několik desetin mm. Převážně tyto prvky musí pracovat s čistým, bezolejovým vzduchem, který je filtrován na hodnotu 5 $\mu$ m. [6]

#### **Rozdělení E/P proporcionálních převodníků:**

##### **a) Regulace tlaku**

- systém tryska/klapka
- ovládací ventily
- proporcionální elektromagnetickými ventily

##### **b) Regulace průtoku**

- proporcionální elektromagnetickými ventily

### **3.2 Elektropneumatický převodník pro regulaci tlaku vzduchu**

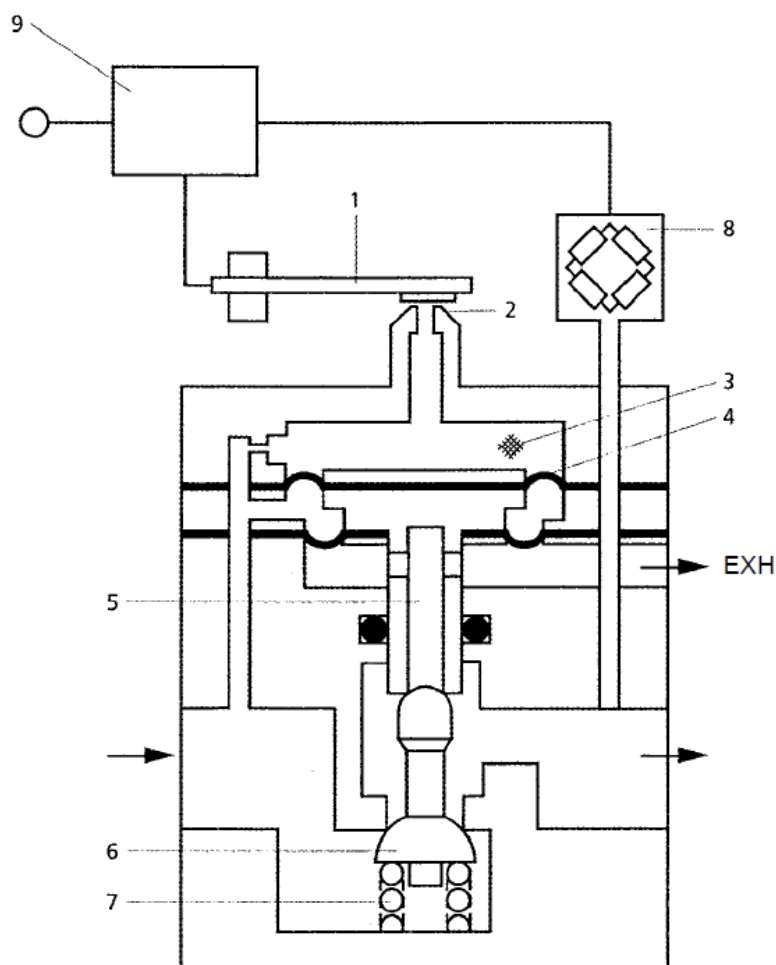
Pro regulaci tlaku vzduchu se využívá tři funkčních principů řízení, a to:

- s tryskou a klapkou
- s ovládacími ventily
- s proporcionálními elektromagnety

#### **Elektropneumatický regulátor tlaku s tryskou a klapkou**

U elektropneumatického tlakového ventilu je řídicím stupněm systém trysky (2) a klapky (1), kde klapka je konstruována jako piezoelektrický dvouvrstvý keramický převodník. U piezoelektrického řídicího členu se využívá tzv. nepřímý piezoelektrický jev, někdy nazývaný inverzní. Vstupní řídicí signál obvykle 0 až 10 V stejnosměrného napětí vyvolá elektrické pole, které způsobí v piezoelektriku mechanické deformace. Tyto deformace prohnu piezoelektrickou keramickou destičku a ta se buď, přiblíží nebo oddálí od ústí trysky.

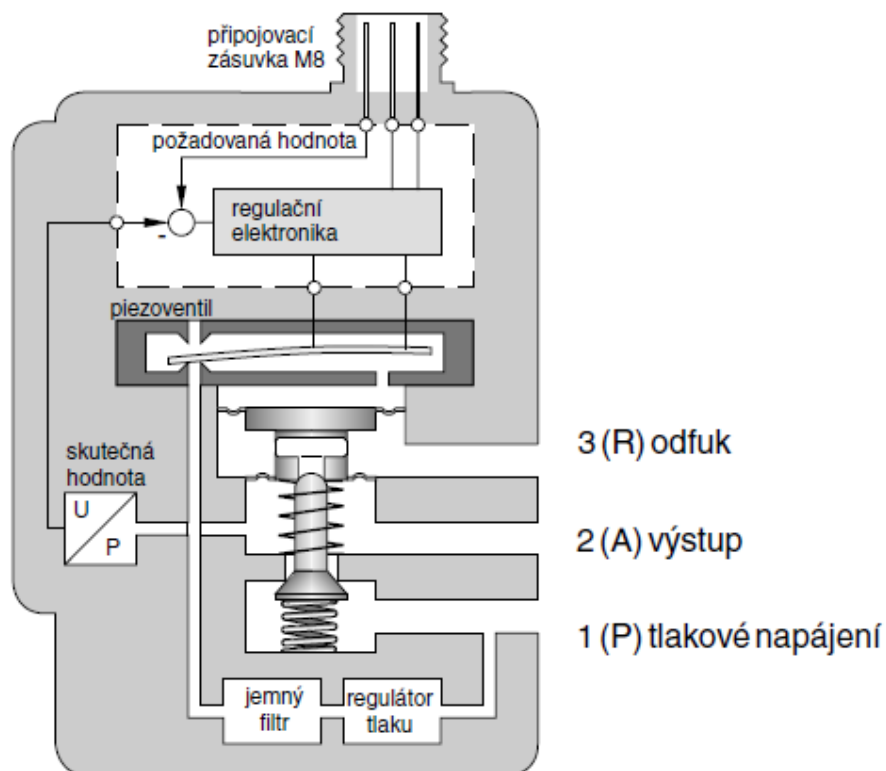
Tyto tlakové ventily pracují obdobně jako v případě pneumatických regulátoru polohy avšak zpětnou vazbu už neplní funkci pružina ale piezoelektrický snímač tlaku (8), který je dále zpracován na signál (proudový nebo napěťový), jak je zřejmé z obr. 3.2 – 1. Tento signál je přiveden do řídicí jednotky (9), ve které se porovnává hodnota zadané řídicí veličiny se skutečnou hodnotou regulované veličiny. Je-li skutečná hodnota (tlaku vzduchu) nižší nebo vyšší než regulovaná hodnota tlaku vzduchu, potom se klapka (1) oddálí nebo přiblíží k trysce (2). Když se membrána (4) prohne dovnitř, stlačí pružinu (7) a otevře hlavní ventil (6). Tím se navýší výstupní tlak na požadovanou hodnotu. V opačném případě, když se klapka oddálí od ústí trysky, dojde k prohnutí membrány nahoru. Toto prohnutí membrány má za následek pokles tlaku v předkomoře (3), který proudí odvzdušňovacím ventilem (5) do atmosféry až do hodnoty žádané veličiny, potom se opět klapka přiblíží a uzavře se odvzdušňovací ventil. [6]



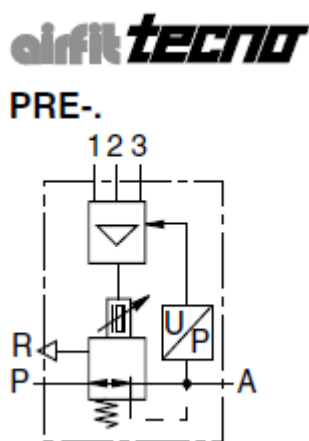
Obr. 3.2-1 Schéma proporcionálního ventilu s tryskou/klapkou [1]

Jiný druh proporcionálního regulátoru tlaku vzduchu pracující na principu trysky a klapky je elektronicky řízený proporcionální regulátor tlaku s PIEZO – řízením, zobrazený na obr. 3.2 – 2. Řídicím elementem v regulátoru tlaku AIRFIT TECNO není jako u běžných proporcionálních regulátorů tlaku magnetický systém, ale piezoventil – zapouzdřená keramická jednotka pracující na principu trysky a pružné desky. Základem celého efektu je to, že piezokeramický materiál se formuje vlivem magnetického pole. V proporcionálním regulátoru tlaku je integrovaná regulační elektronika, která řídí piezoventil tak, že střídavě vychyluje jazýček piezoventilu na obě strany a tím vzniká požadovaný řídicí tlak pro membránu. Tento tlak vyvine patřičnou sílu na membránu, která následně působí na pístek hlavního ventilu a ventilu odvzdušnění. Tím se nastaví na výstupu tlak, který je pomocí snímače tlaku porovnán se zadanou hodnotou a případně pomocí elektroniky upraven. Odchylka hystereze u elektronického regulátoru tlaku

AIRFIT TECNO činí méně než 0,02 bar. Na obr. 3.2 – 3 je schematická značka regulátoru tlaku s piezoelektrickým ovládáním. [8]



Obr. 3.2-2 Regulátor tlaku s piezoelektrickým ovládáním

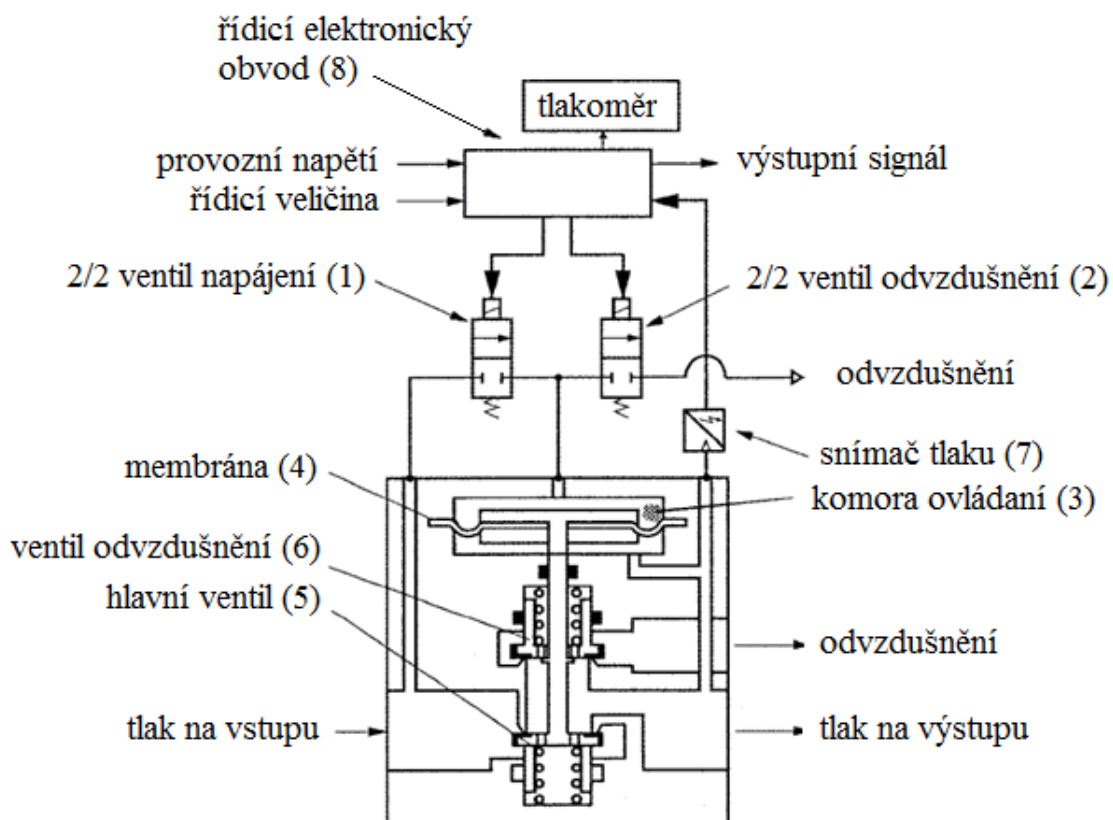


Obr. 3.2-3 Schematická značka regulátoru tlaku s piezoelektrickým ovládáním

## Elektropneumatický regulátor tlaku s ovládacími ventily

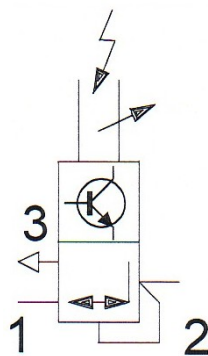
Funkce tohoto ventilu je založena na dvou pilotních 2/2 elektromagnetických ovládaných ventilech jak je zřejmé z obr. 3.2 – 4. Pilotní ventily pracují v uzavřeném regulačním obvodu. Schematická značka tohoto ventilu je na obr. 3.2 – 5.

Opět jako v předchozím případě řídicí jednotka (8) porovnává hodnotu zadané řídicí veličiny se skutečnou hodnotou regulované veličiny. Když tlakové čidlo (7) zaznamená pokles výstupního tlaku, pak se aktivuje elektromagnet pilotního ventilu (1), který zvýší tlak nad membránou (3), tím se membrána (4) prohne dolů a otevře hlavní ventil (5), až na hodnotu žádané veličiny, potom se ventil opět uzavře. Druhý pilotní ventil (2) slouží pro snížení tlaku v systému. Snížení výstupního tlaku se děje pomocí druhého pilotního ventilu, který se aktivuje. Pokles tlaku nad membránou otevře ventil odvodu (6). Přebytný tlak uniká do atmosféry až do doby, kdy se pilotní ventil uzavře. Tento systém pracuje s vysokou přesností řízení tlaku  $\pm 1 \%$ . [6]



Obr. 3.2-4 Schéma proporcionálního rozvaděče s ovládacími ventily [6]

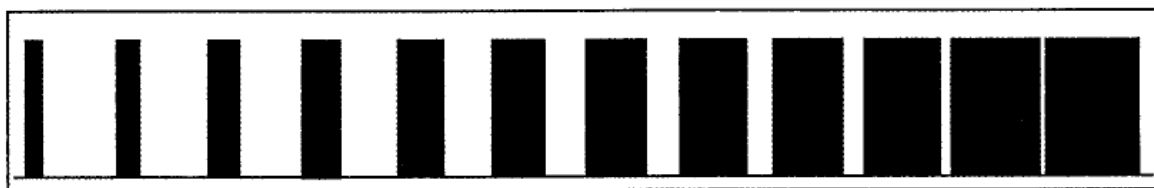




Obr. 3.2-5 Schematická značka

### Princip funkce řízení elektronického obvodu 2/2 ventilů

Řídicí elektronika ventilů nedovolí, aby došlo k překmitnutí regulované soustavy i při rychlé reakci ventilů. Elektromagnety ovládacích 2/2 ventilů jsou řízený tzv. pulzně – šířkovou modulací (PWM) a pulzně – frekvenční modulací (PFM). Tyto modulace jsou zobrazeny na obr. 3.2 – 6 a 3.2 – 7.



Obr. 3.2-6 Pulzně – šířková modulace (konstantní frekvence)

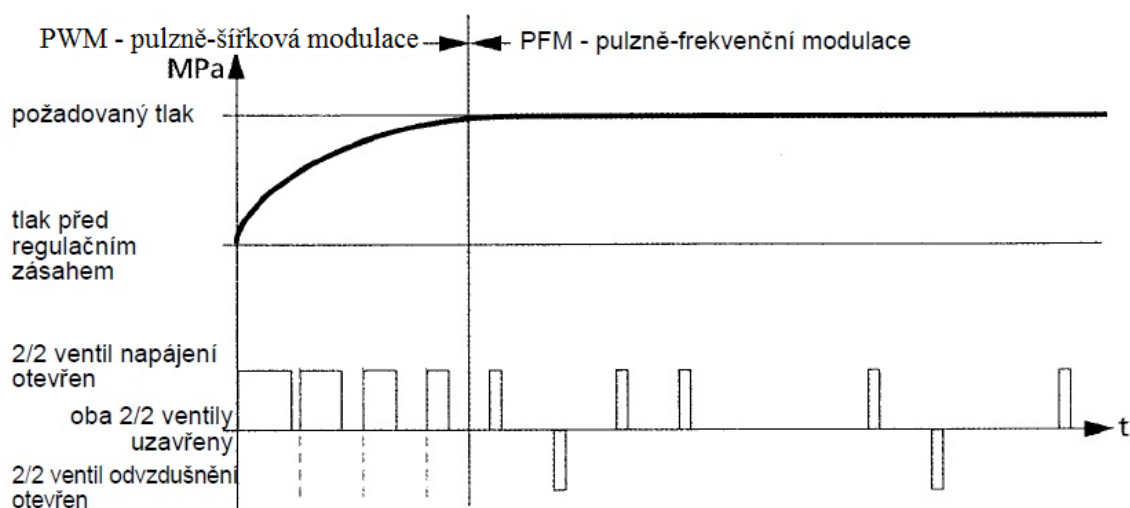


Obr. 3.2-7 Pulzně – frekvenční modulace (konstantní čas otevření)

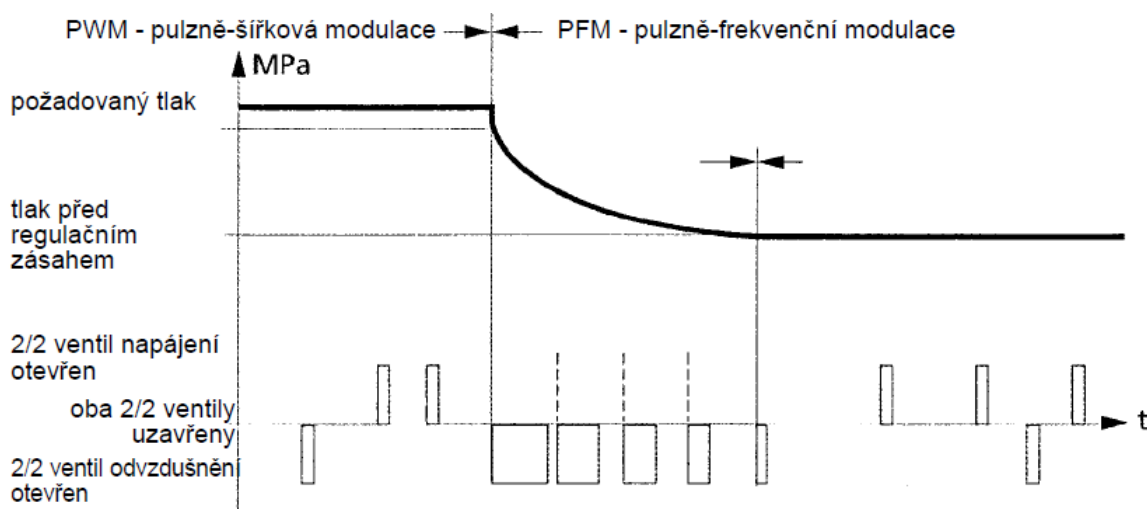
Pokud požadujeme navýšit tlak v obvodu, pracuje řídicí elektronický obvod v režimu pulzně – šířkové modulace (PWM). Elektromagnet 2/2 ventilu napájení je aktivováno a ventil je otevřen v proměnných časových cyklech. Čím více se přiblíží skutečnému požadovanému tlaku, tím kratší je čas otevření ventilu. Když požadujeme snížení tlaku vzduchu, elektromagnet 2/2 ventilu odvzdušnění je aktivováno a ventil je otevřený v proměnných časových cyklech. [6]

Před dosažením požadované hodnoty tlaku vzduchu začne elektronicky řídicí obvod pracovat v režimu pulzně – frekvenční modulace (PFM). Elektromagnety obou 2/2 ventilů jsou otevřeny v konstantních časových cyklech. Oba ventily jsou aktivní pouze při dosažení určitého rozdílu tlaků ( $\pm 1\%$  z rozsahu tlaků) mezi požadovanou a skutečnou hodnotou tlaku vzduchu. Pokud se rozdíl tlaku zvětší, pak řídicí elektronický obvod začne opět pracovat v režimu pulzně – šířkové modulace (PWM).

Na obr. 3.2 – 8 je znázorněn princip navýšení tlaku vzduchu v obvodu a přechod mezi pulzně – šířkovou modulací a pulzně – frekvenční modulací (PFM). Na obr. 3.2 – 9 je opět znázorněn přechod mezi modulacemi, ale pro případ snížení tlak vzduchu v obvodu. [6]



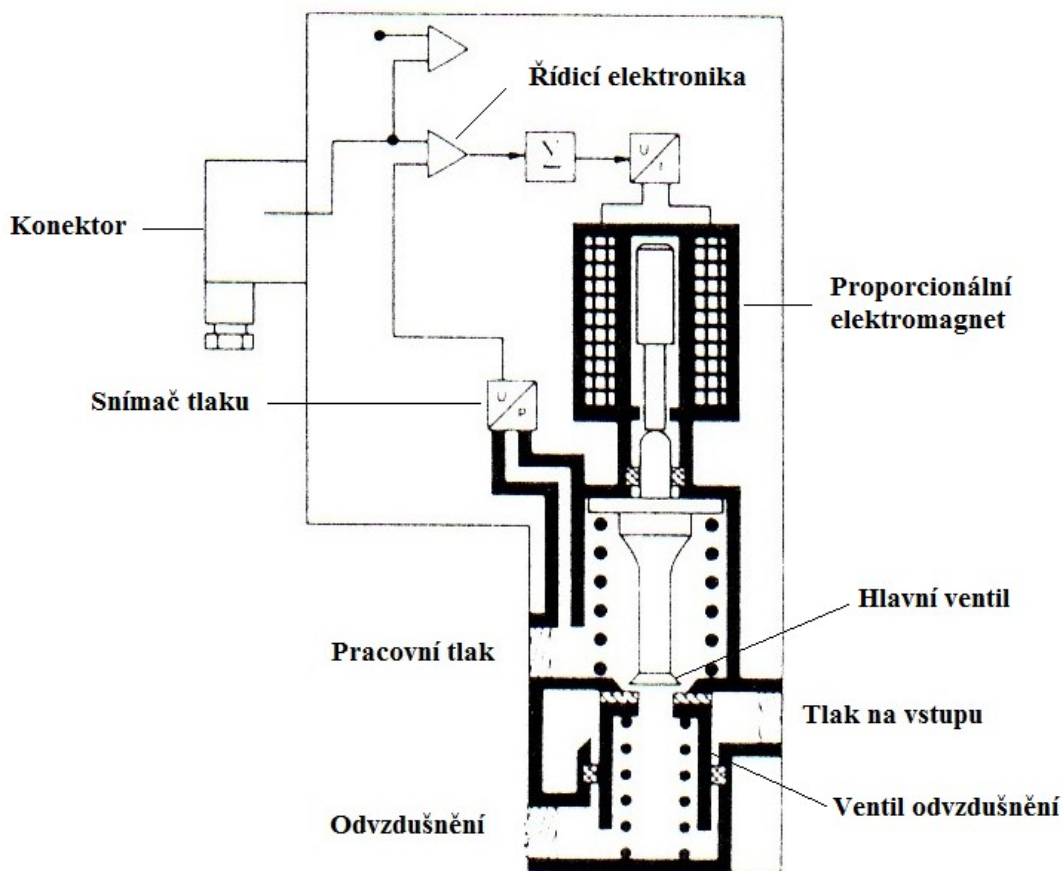
Obr. 3.2-8 Zvýšení tlaku vzduchu v obvodu



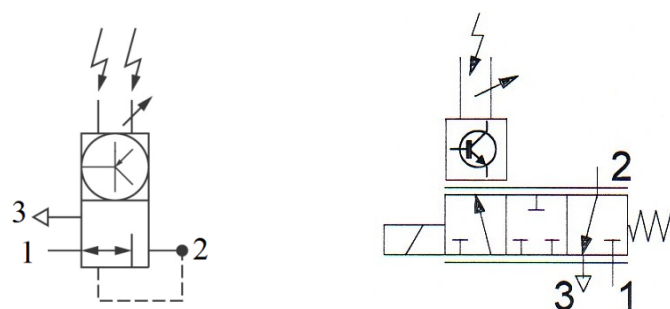
Obr 3.2-9 Snížení tlaku vzduchu v obvodu

## Elektropneumatický regulátory tlaku s proporcionálním magnetem

Tyto regulátory tlaku se vyznačují proporcionálním řízením elektromagnetů. Elektromagnety jsou napájené stejnosměrným napětím. Podle použití mohou být proporcionální elektromagnety zdvihové nebo silové. Na obr 3.2 – 10 je znázorněn podélný řez proporcionálním regulátorem tlaku. V klidové poloze rozváděče tlačí na ventily pružiny, které udržují, ventil odvzdušnění otevřený a hlavní ventil uzavřený. Tento regulátor tlaku je opatřen snímačem tlaku přímo zabudovaný v tělese rozváděče, který snímá tlak ve výstupní větvi. Řídicí elektronika proporcionálního regulátoru tlaku porovnává žádanou hodnotu se skutečnou hodnotou od snímače tlaku vzduchu v regulátoru tlaku. Pokud je žádaná hodnota nižší nebo vyšší, pak se jádro elektromagnetu posune nahoru a dojde k otevření odvětracího ventilu (pokles tlaku vzduchu), nebo když se jádro elektromagnetu posune směrem dolů, otevře se hlavní ventil (navýšení tlaku vzduchu). Dvě odlišné schematické značky regulátoru tlaku z proporcionálním elektromagnetem jsou na obr. 3.2 – 11. [6]

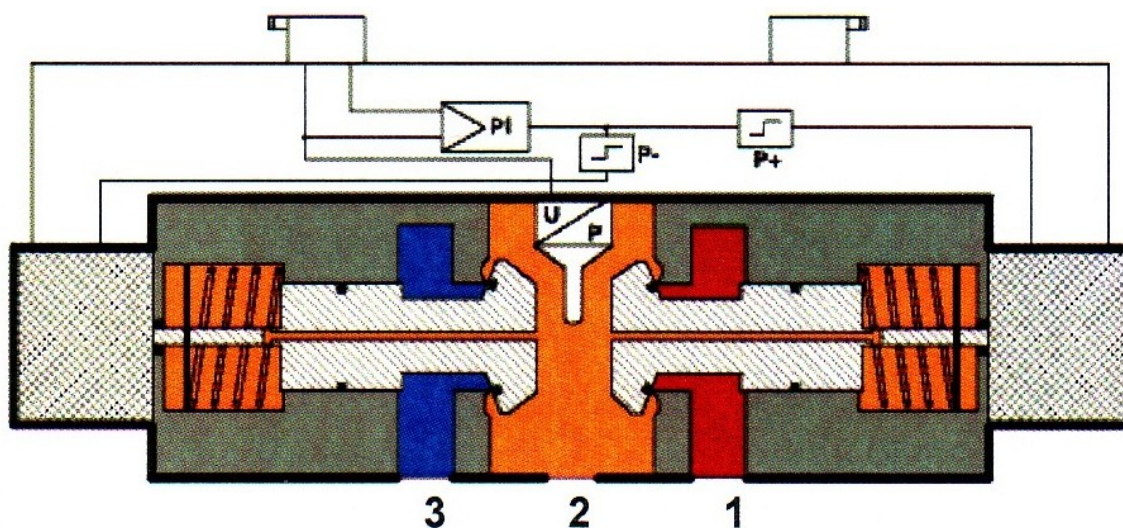


Obr. 3.2-10 Regulátor tlaku s proporcionálním elektromagnetem [14]

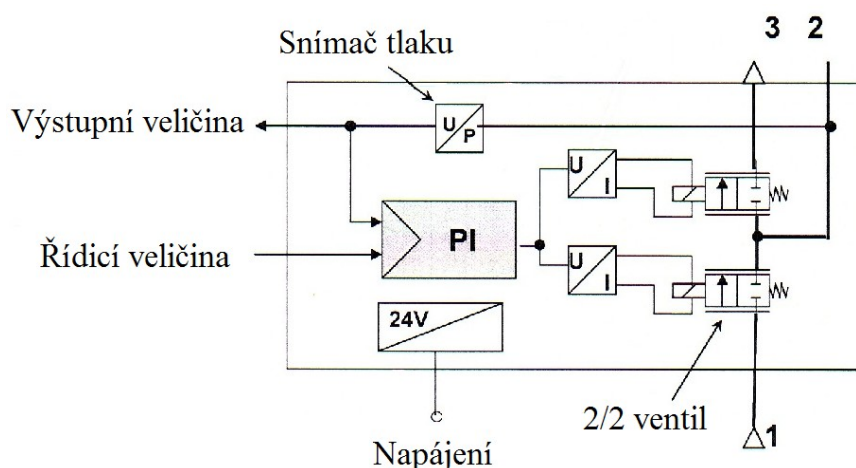


Obr. 3.2-11 Dva způsoby značení regulátoru tlaku s proporcionálním elektromagnetem

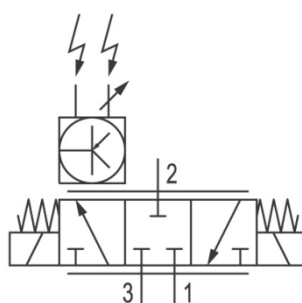
Jiný typ proporcionálního regulátoru tlaku, který je znázorněn na obr. 3.2 – 12 pracuje na obdobném principu jako regulátor tlaku s ovládacími ventilkou. Avšak je rozdíl v řízení, regulátor tlaku má dva proporcionálně ovládané elektromagnetické ventily. Jeden elektromagnet ovládá ventil na vstupu a druhý ovládá ventil odvodu. Regulátor tlaku má v klidové poloze oba ventily uzavřeny. Tento druh regulátoru tlaku je vhodný pro aplikace, v nichž se požaduje udržet konstantní tlak po určitou dobu. Například pro aplikace upnutí různých druhů obrobků, které mají rozdílnou sílu upnutí. Po upnutí obrobků regulátor docílí požadovanou hodnotu tlaku a ventily se poté uzavřou. Elektromagnety zůstávají bez napětí a nedochází k jejich zahřívání. Vnitřní schéma řízení regulátoru tlaku s proporcionálními elektromagnety je zobrazen na obr. 3.2 – 13. Schematická značka proporcionálního regulátoru tlaku je na obr. 3.2 – 14. [14]



Obr. 3.2-12 Regulátor tlaku s proporcionálními elektromagnety [14]



Obr. 3.2-13 Schéma řízení regulátoru tlaku s proporcionálními elektromagnety [14]



Obr. 3.2-14 Značka regulátoru tlaku s proporcionálními elektromagnety

### 3.3 Elektropneumatické převodníky pro regulaci průtoku vzduchu

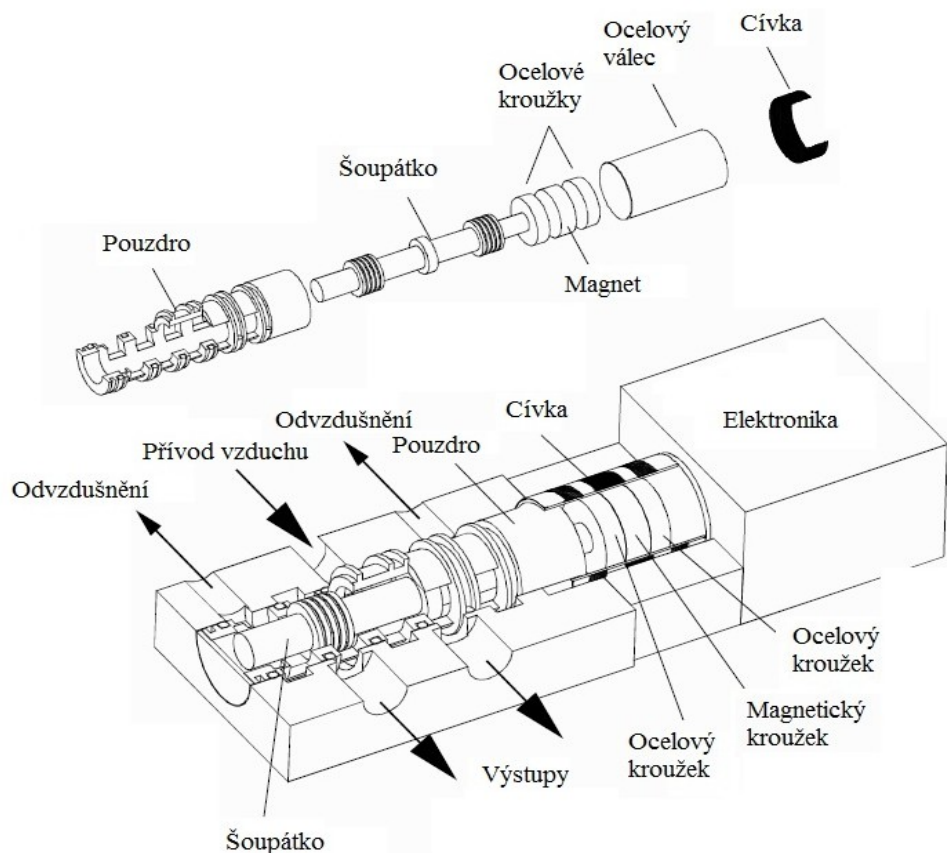
Pro regulaci průtok vzduchu používáme pouze rozváděče, které jsou řízené proporcionálními elektromagnety. Používají se k řízení směru a regulaci rychlostí pneumatických lineárních pohonů, k řízení otáček rotačních pneumatických motorů, nebo k regulaci množství vzduchu stříkacích zařízení. [6]

#### Elektropneumatické rozváděče s proporcionálním magnetem

Funkce těchto proporcionálních rozváděčů k řízení průtoku vzduchu je obdobná s funkcí proporcionálního ventilu pro řízení tlaku vzduchu. Rozdíl je pouze, že nemají zpětnou vazbu od výstupního tlaku na polohu šoupátka, a proto regulační smyčka není uzavřena. Průtok vzduchu je řízen nikoliv regulován. Průtok vzduchu lze regulovat pouze dodatečnou montáží průtokoměrů do výstupní větve potrubí a tím přivedeme signál do

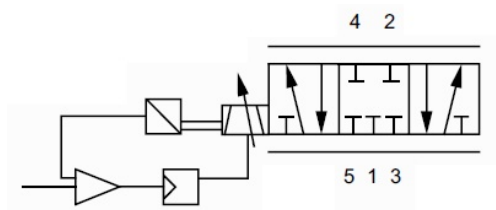
porovnávací řídicí jednotky. Tím docílíme, že systém už není řízen ale regulován zpětnou vazbou od průtokoměru vzduchu.

Na obr. 3.3 – 15 je znázorněn řez proporcionálním 5/3 rozváděčem. Ocelové šoupátko se pohybuje v ocelovém pouzdře s velmi malým třením. Přesto, že tření je velmi malé, není možné ovládat jeho polohu normálním řídicím signálem. Vstupním signálem je stejnosměrné napětí, které je v zesilovači zesíleno a převedeno na proudový řídicí signál. Toto nepostačuje pro správnou funkci proporcionálního elektromagnetu a signál je dále upraven na střídavé napětí s malou amplitudou. Frekvence je obvykle 140 až 170 Hz to způsobuje, že šoupátko kmitá (projevuje se slyšitelným bručením). Frekvence kmitání šoupátka je závislá od velikosti šoupátka, větší šoupátko má menší frekvenci kmitání až 65 Hz. Frekvence kmitání šoupátka je také závislá od jeho polohy, obvykle při minimálním průtoku kolem střední polohy je frekvence větší než při maximálním vychýlení šoupátka. Kmitavý pohyb šoupátka snižuje statické tření a umožňuje okamžitou a rychlou změnu na vstupní signál a na signál zpětné vazby. Tím je zaručena nejmenší možná hystereze. Na obr. 3.3 – 16 je znázorněná schematická značka proporcionálního 5/3 rozváděče. Externí řídicí jednotka pro generování kmitavého signálu je zobrazena na obr. 3.3 – 17. [1], [6]

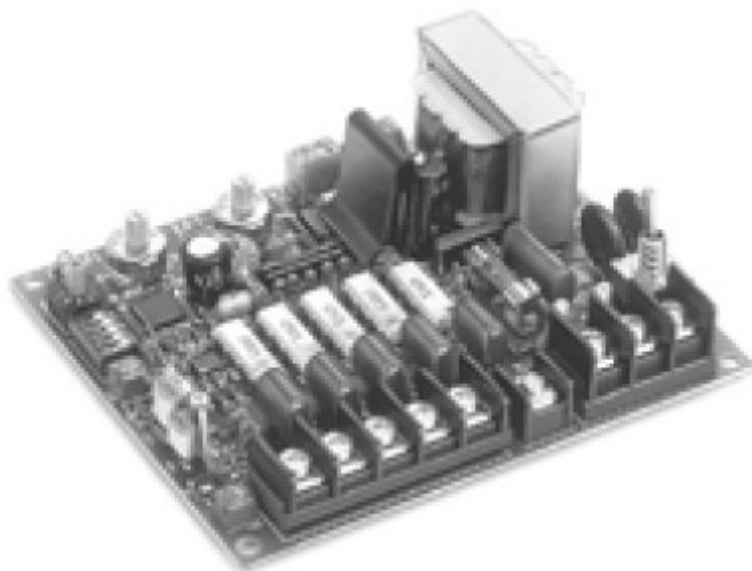


Obr. 3.3-15 Řez proporcionálním 5/3 rozváděčem [1]



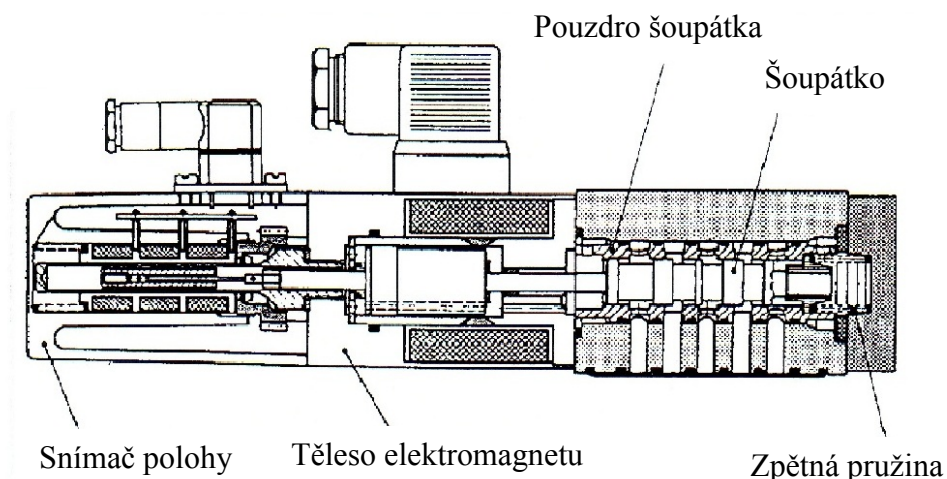


Obr. 3.3-16 Značka proporcionálního 5/3 rozváděče [1]



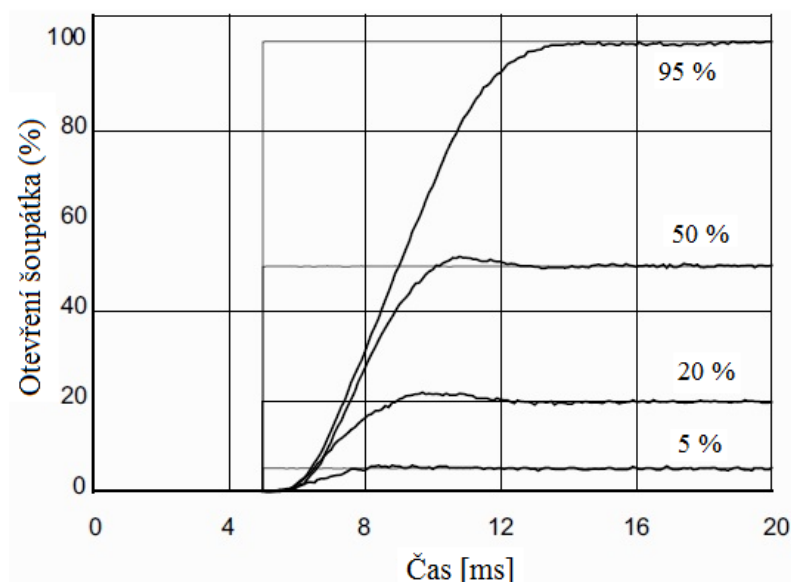
Obr. 3.3-17 Zesilovač pro generování kmitavého signálu [6]

Na obr. 3.3 – 18 je znázorněný řez proporcionálním rozváděčem 5/3 se snímačem polohy. Tyto proporcionální rozváděče mají nejmenší možnou hysterezi a opakovatelnost, které je zaručena neustálým snímáním polohy šoupátka. V předchozím případě se zdvih reguloval pouze vstupním napětím, které je závislé na pasivních odporech a na protisíle pružiny. Proporcionální rozváděč se snímačem polohy udržuje požadovanou polohu šoupátka nezávisle na protisíle a pasivních odporech. Pneumatický obvod s těmito proporcionálními rozváděči není řízen, ale regulován. To je zaručeno zpětnou vazbou od snímače polohy, který např. reguluje průtok stlačeného média. [14]



Obr. 3.3-18 Proporcionální rozvaděč se snímačem polohy šoupátka [14]

Na obr. 3.3 – 19 je graf závislosti doby otevření šoupátka na čase. Z grafu je patrný čas otevření proporcionálního rozvaděče, který probíhá při vychýlení šoupátka o 5, 20, 50 a 95 %. Doby otevření proporcionálních rozvaděčů jsou velmi malé obvykle několik ms. Doba otevření se liší podle konstrukce a velikostí proporcionálních rozvaděčů. Šoupátka s menšími průměry mají kratší dobu otevření a šoupátka s velkými průměry mají delší dobu otevření. To je dáno většími setrvačnými silami, které působí proti pohybu šoupátka. [1]

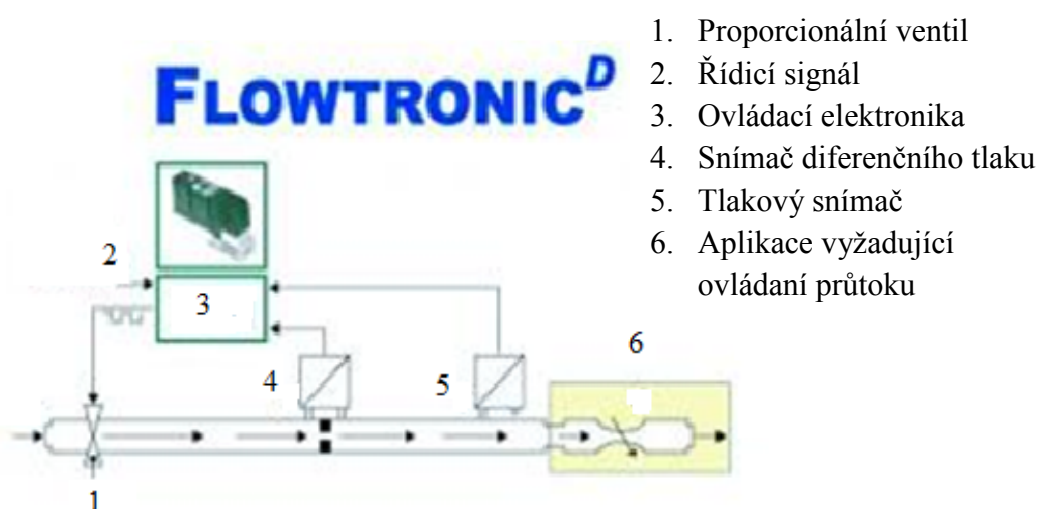


Obr. 3.3-19 Závislost otevření šoupátka na čase [1]



Takový zvláštní druh proporcionálního rozváděče je na obr. 3.3 – 20, je to poměrně nový prvek, který obsahuje přímo průtokoměr integrovaný do tělesa rozváděče. Pneumatický obvod s tímto prvkem je regulován, protože regulační smyčka je uzavřena s integrovaným průtokoměrem. Technické provedení digitálního proporcionálního rozváděče umožňuje regulovat průtok pouze v jednom směru. Má jeden vstup a jeden výstup, neumožňuje zapojení např. přímočarých pneumatických motorů. Reverzace chodu by musela být zajištěna dodatečnou montáží pneumatických prvků. Je vhodný pro aplikace, kde médium protéká jedním směrem. [9]

Flowtronic D doplňuje existující řady analogových proporcionálních regulátorů Posiflow a Servotronic o novou variantu s digitálním regulátorem. Tento nový proporcionální regulátor průtoku s digitálním řízením je možné konfigurovat s použitím PC programu, který optimalizuje nastavované parametry regulace a její přesnost. Spolehlivost a dynamické vlastnosti jsou dány jeho přímočinnou konstrukcí. Původní klasické regulátory Posiflow a Servotronic s vestavěným analogovým regulátorem se snadno adaptují na standardní řídicí požadavky. Stále častěji se setkáváme s aplikacemi, ve kterých je odvození a nastavení správných parametrů regulátoru velmi komplikované. Pro takové situace je digitalizace regulátoru ideálním řešením. Nový Flowtronic D lze propojit s počítačem kabelem přes rozhraní R232 nebo USB přímo v technologickém provozu. Obousměrná komunikace dovoluje programovat parametry regulátoru ventilu a zároveň vizualizovat odezvu výstupního tlaku. [9]



Obr. 3.3-20 Schéma zapojení digitálního proporcionálního rozváděče [9]



Obr. 3.3-21 Digitální proporcionální rozváděč [9]

### Princip funkce škrcení hranou šoupátka

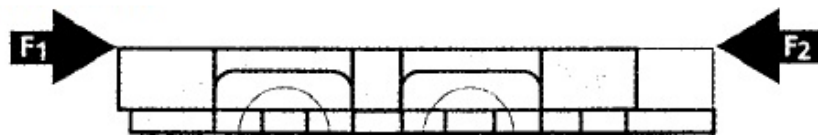
Na obr. 3.3 – 22 je průběh škrcení vzduchu mezi hranou šoupátka a tělesem rozváděče. Níže je popsána funkce řízení jednotlivých poloh proporcionálního rozváděče 5/2.

- (1)  $F_1 < F_2$  stlačený vzduch proudí vstupním kanálem 1 do výstupního kanálu 2. Výstupní kanál 4 je spojen s kanálem od vzdušnění 5, až se dosaženo rovnováhy sil, tj.  $F_1 < F_2$ .
- (2)  $F_1 = F_2$  vstupní kanál 1 a kanály od vzdušnění 3 a 5 jsou uzavřeny, protože bylo dosaženo požadované hodnoty tlaku vzduchu.
- (3)  $F_1 > F_2$  stlačený vzduch proudí vstupním kanálem 1 do výstupního kanálu 4. Výstupní kanál 2 je spojen s kanálem od vzdušnění 3, až je dosaženo rovnováhy sil, tj.  $F_1 > F_2$ .

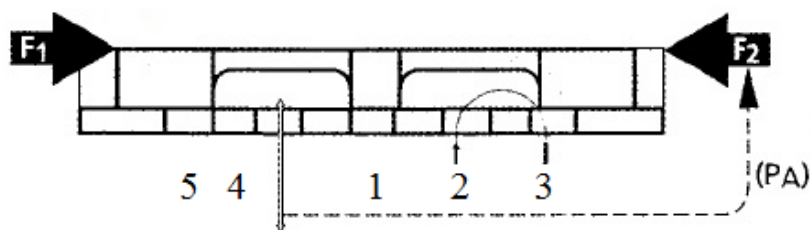
$F_1$ : Síla vyvinutá při průchodu elektrického proudu cívkou proporcionálního elektromagnetu.

$F_2$ : Síla vyvinutá šroubovou pružinou a zpětným tlakem ( $P_A$ ) na čelo šoupátka. [6]

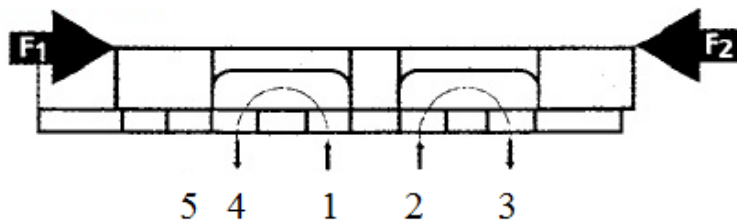
(1)  $F_1 < F_2$



(2)  $F_1 = F_2$



(3)  $F_1 > F_2$

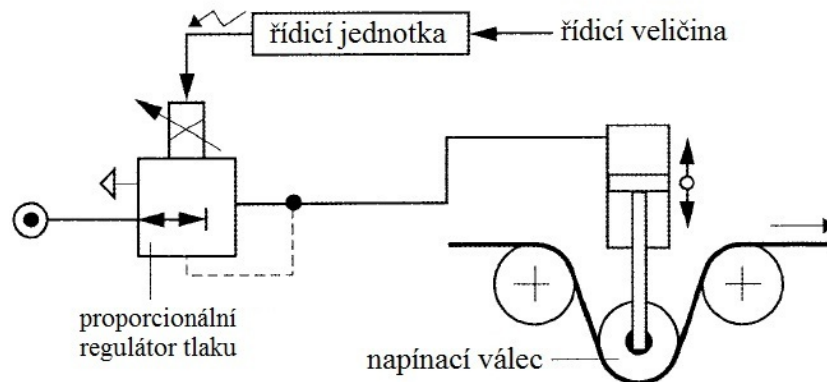


Obr. 3.3-22 Funkce průběhu škrcení rozváděče 5/2 [6]

#### 4. Pneumatická obvodová a elektrická schémata

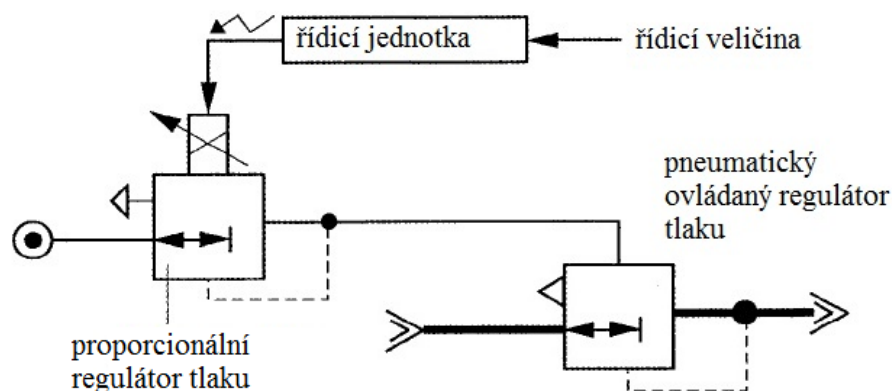
Proporcionální řízení se používá v různých pneumatických aplikacích. Aby správně fungovaly pneumatické obvody s proporcionálním řízením, musí být vhodně sestavené pneumatické a elektrické zapojení. Jednotlivé prvky musí být pečlivě vybrány dle požadavků dané aplikace použití. Různé technologické procesy vyžadují různé proporcionální prvky např. pro regulaci tlaku tzv. síly, nebo pro regulaci průtoku tzv. rychlosti a množství použitého média. Na následujících příkladech jsou znázorněné pneumatická obvodová a elektrická schémata pro zapojení různých druhů proporcionálního řízení.

Na obr. 4 – 1 je příklad zapojení proporcionálního regulátoru tlaku vzduchu pro regulaci napětí pásu (např. papíru) řízením síly válce. Proporcionální regulátor tlaku udržuje konstantní tlak v pneumatickém válci a udržuje konstantní napínací sílu papíru. Papír je relativně náchylný na protržení a vyžaduje přesné řízení napínací síly. Proporcionální regulátor tlak dokáže velice rychle reagovat a přizpůsobit tlak tzv. napínací sílu.



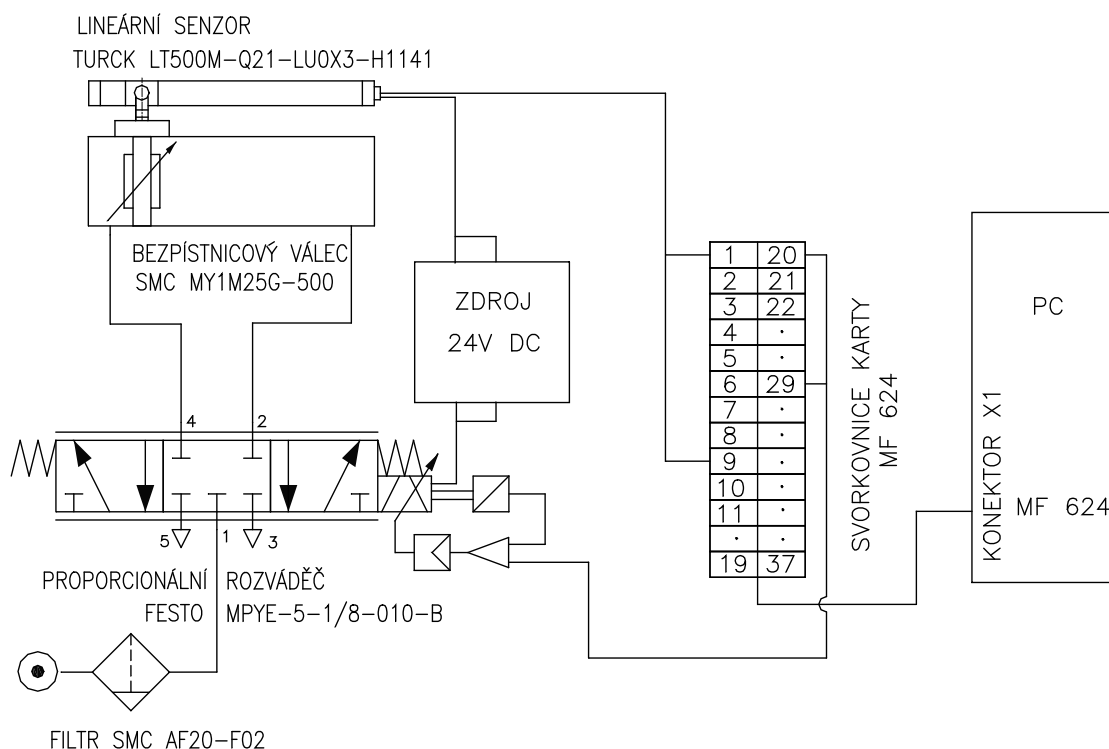
Obr. 4-1 Schéma obvodu pro regulaci napínání pásu [6]

Podobné zapojení proporcionálního regulátoru tlaku je na obr. 4 – 2. Je to nepřímé regulování tlaku vzduchu. První regulátor tlaku je proporcionální a je řízen přes řídící jednotku řídící veličinou. Druhý regulátor tlaku je ovládán pneumaticky. Toto zapojení umožňuje regulovat vysoké průtoky vzduchu.



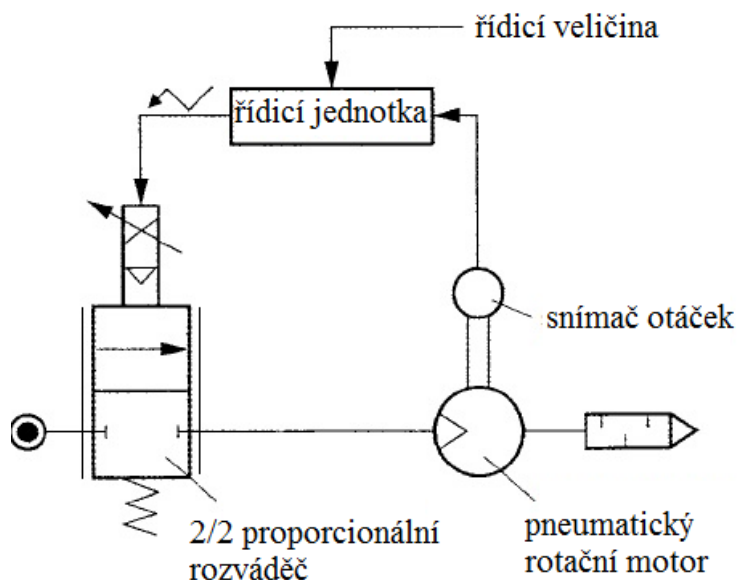
Obr. 4-2 Nepřímé řízení regulátoru tlaku [6]

V laboratoři pneumatických prvků je sestaven praktický příklad regulování polohy bezpístnicového pneumomotoru, který je zobrazen na obr. 4 – 3. Bepístnicový přímočarý pneumomotor je ovládán proporcionálním rozváděčem MPYE – 5. Bepístnicový přímočarý pneumomotor je pevně spojen s lineárním senzorem TURCK LT 500, který snímá jeho polohu. Oba tyto prvky jsou připojeny na zdroj napájecího napětí a jsou připojeny na svorky svorkovnice MF 624. Svorkovnice je propojena s multifunkční vstupně – výstupní měřicí karty MF 624. Úloha je řízená v softwaru Matlab – Simulink. Tento příklad zapojení umožňuje plynule řídit polohu bepístnicového pneumomotoru.



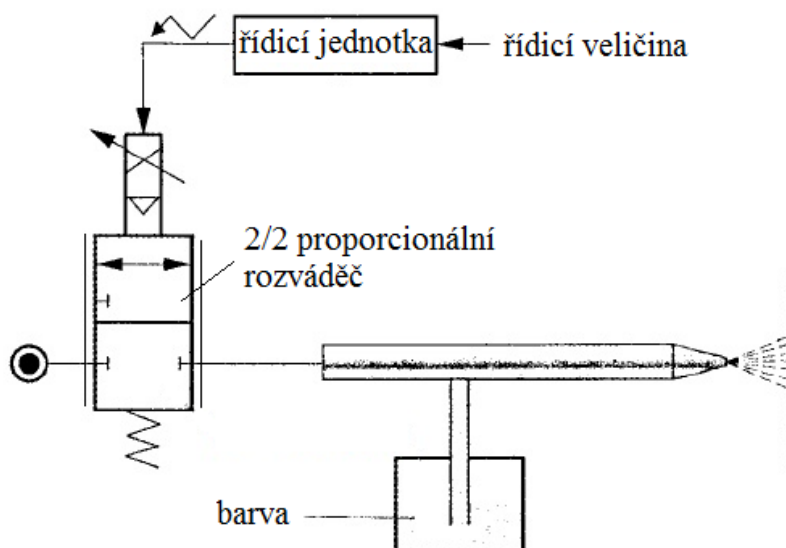
Obr. 4-3 Schéma řízení bepístnicového pneumomotoru

Regulace otáček rotačního pneumomotoru je zobrazen na obr. 4 – 4. Rotační pneumomotor je ovládán pomocí proporcionálního rozváděče. Snímač otáček a proporcionální rozváděč jsou připojeny do řídicí jednotky. Řídicí jednotka porovnává řídicí veličinu s veličinou od snímače otáček. Hodnoty se porovnají a následně řídicí jednotka vyšle signál pro proporcionální rozváděč.



Obr. 4-4 Schéma řízení rotačního pneumomotoru [6]

Množství barvy je regulováno pomocí proporcionálního rozváděče, jak je zřejmé s obr 4 – 5. Dle požadavků množství barvy vyšle řídicí veličina signál do řídicí jednotky. Řídicí jednotka ovládá nepřímě řízený proporcionální rozváděč. Ten reguluje množství vzduchu, který proudí k stříkací trysce. Podle potřeby množství barvy proporcionální rozváděč pouští více či méně protékajícího vzduchu.



Obr. 4-5 Schéma řízení množství barvy [6]

## 5. Příprava prvků pro měření

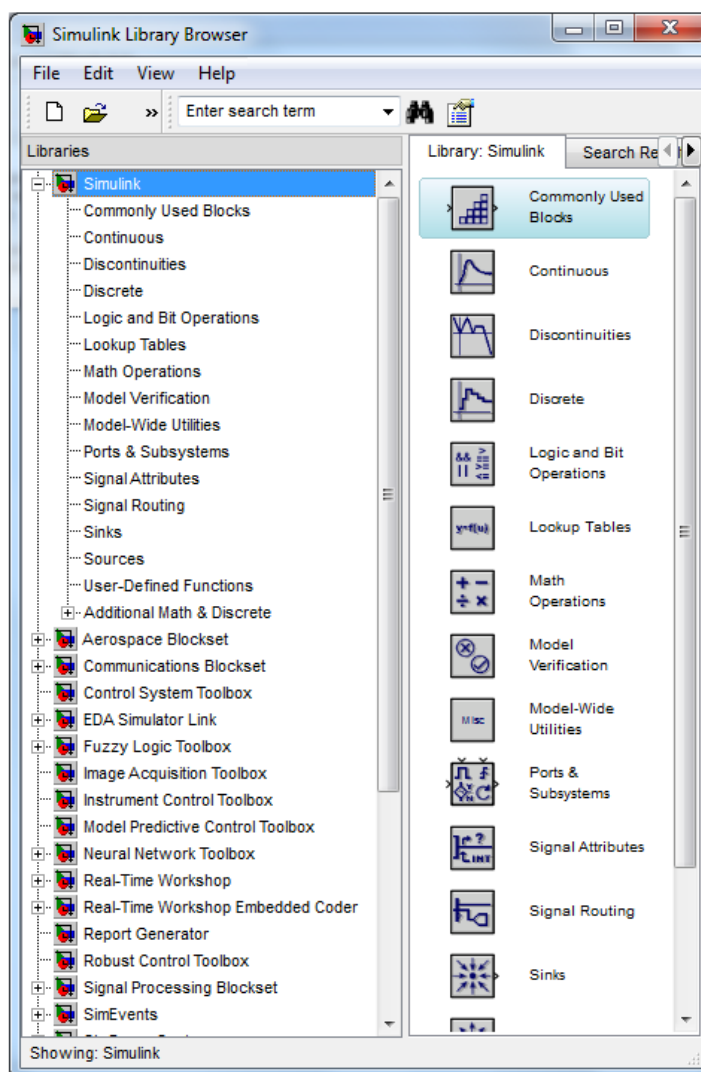
Měření probíhá s pneumatickými prvky, které je třeba správně sestavit a nastavit na správnou hodnotu. Hlavně se jedná o snímač tlaku a průtoku vzduchu. Všechny prvky v pneumatickém obvodu vyžadují správné zapojení do řídicí karty a zapojení na správné póly napájecího zdroje. Prvky se nesmí přepólovat, mohl by nastat zkrat a následné zničení prvků. Proto se musí dbát zvýšené pozornosti při zapojování do napájecího zdroje. Na zdroji musí být nastavena správná hodnota napětí, které vyžadují pneumatické prvky.

Také musíme dbát zvýšené opatrnosti při zapojování do řídicí karty. Je potřeba správně zvolit jednotlivé svorky na multifunkční vstupně - výstupní měřicí kartě. Zvolením nesprávných svorek, by mohlo dojít k chybným hodnotám měření, které se následně vyhodnocují.

### 5.1 Prostředí Matlab – Simulink

Program Simulink je nástavbou známého softwaru MATLAB. S jeho pomocí je uživatel schopen rychle a poměrně přesně simulovat různé děje, které se odehrávají v daném pneumatickém obvodu.

V Simulinku můžeme modelovat pneumatické systémy právě tak, jako bychom sestavovali praktické úlohy pro různé aplikace pneumatických obvodů. Program umožňuje jak ovládání tak řízení jednotlivých pneumatických prvků. Simulink obsahuje knihovnu dostupných bloků rozdělené do podoblastí podle zařízení, jako jsou například spojitě operátory, zdroje, matematické operátory nebo výstupy, jak vidíme na obr. 5.1 – 1. Simulink v základní verzi obsahuje velké množství bloků použitelných v jednotlivých modelech.



Obr. 5.1-1 Knihovna funkčních bloků Simulinku

Program umožňuje:

- simulaci systému, který chceme analyzovat
- analyzovat průběhy požadovaných veličin
- snadno modifikovat již navržený systém
- vytvářet uživatelské bloky
- kombinovat hydraulické prvky s prvky mechanickými a elektrickými

Abychom mohli komunikovat s různými prvky, které obsahují model, musí být Matlab – Simulink rozšířením o Real Time Toolbox.

Real Time Toolbox je modul MATLABU, který slouží pro propojení Simulinku s reálným světem. Umožňuje přístup k vnějším analogovým a digitálním signálům téměř



bez znalosti nastavení hardwaru. Použitím knihovny bez jakýchkoliv dalších přídavných zařízení, můžeme experimentovat se zpracováním signálů, seřízením regulátoru a dalšími podobnými úkoly přímo z prostředí Simulinku. Je založen na jádře reálného času a ovladačích populárních přídavných karet pro vstup a výstup signálů. Umožňuje provádět sběr dat se zajištěným pravidelným vzorkováním a jejich další zpracování. Real Time Toolbox vytváří z počítače měřicí ústřednu tím, že umožňuje práci s vnějšími signály v reálném čase.

Pro řízení v reálném čase pomocí Real Time Toolboxu máme dvě možnosti:

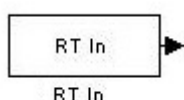
- pomocí výkonné knihovny systému Simulink
- pomocí M – files

Vlastnosti Real Time Toolboxu:

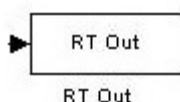
pracuje pod Microsoft Windows95, Windows98, Windows NT4.0, Windows 2000, WindowsXP, Windows7

- vzorkovací frekvence až do 66 kHz bez nutnosti používat externí zdroje hodinového signálu
- knihovna bloků pro systém Simulink umožňuje používat většinu funkcí přímo z blokového schématu
- asynchronní přístup přímo na vstupní a výstupní porty
- automatické vytváření skriptových M-souborů z graficky zadávaných povelů
- podpora generování periodických signálů na analogových výstupních kanálech
- zpracování dat on-line polynomálními filtry
- on-line řízení rychlých systémů s vestavěnými lineárními regulátory

V tomto rozšíření je knihovna bloků. V našem případě budeme potřebovat 3 základní bloky z knihovny, které jsou zobrazeny a popsány níže.



Blok **RT In** slouží pro získávání dat, kde musí být data zpracovány okamžitě po jejich získání



Blok **RT Out** se používá pro systémy generující signál, kde musí být data poslána na výstup bez zpoždění



Blok **Adapter** slouží k načtení hardwarových ovladačů měřicí karty a jejich nastavení

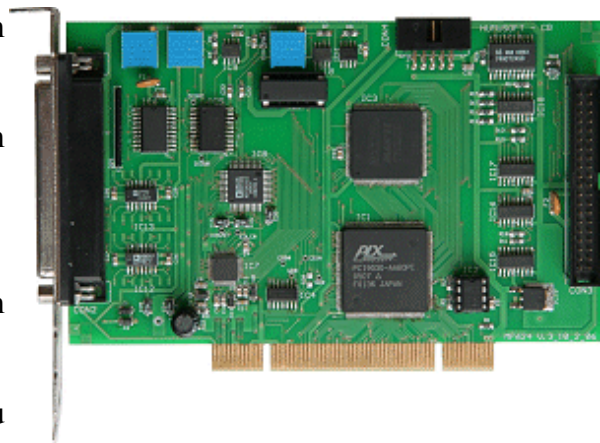
Nezbytnou součástí **Real Time Toolboxu** je měřicí a řídicí karta, s kterou Matlab – Simulink spolupracuje. V tomto případě se jedná o multifunkční vstupně – výstupní měřicí a řídicí kartu **MF 624** od firmy HUMUSOFT.

HUMUSOFT se specializuje na výrobu měřicích karet pro PC, která je znázorněná na obr. 5.1 – 2, použitelných jak v laboratorních, tak v průmyslových podmínkách. Všechny tyto karty jsou podporovány produkty **Real – Time Windows Target**, **xPC Target** a **Real Time Toolbox** pro **MATLAB**. Spolu s těmito programovými balíky tvoří integrované a snadno použitelné prostředí pro vývoj aplikací pro řízení a simulaci v reálném čase.

Parametry multifunkční měřicí karty **MF624**:

Vlastnosti:

- Osm single – ended 14 – bitových analogových vstupů
- Osm 14 – bitových analogových výstupů
- Krátká doba převodu
- 8 digitálních vstupů, 8 digitálních výstupů
- 4 vstupy inkrementálních snímačů (diferenciální)
- 4 čítače/časovače
- Nízká spotřeba
- Ovladač pro Real Time Toolbox pro MATLAB
- Ovladač pro Real-Time Windows Target
- Ovladač pro xPC Target
- Ovladač pro Windows, 32 i 64 – bitové aplikace



Obr. 5.1-2 Měřicí karta

### Technické parametry:

#### - Analogové vstupy

Kanály:	8 kanálů
A/D převodník:	14 – bitový, doba převodu 10 $\mu$ s
Čas převodu:	1.6 $\mu$ s 1 kanál 1.9 $\mu$ s 2 kanály 2.5 $\mu$ s 4 kanály 3.7 $\mu$ s 8 kanálů
Vstupní rozsahy:	$\pm 10$ V
Vstupní impedance:	$10^{10} \Omega$
Spouštění:	programově, časovačem, externě

#### - Analogové výstupy

Kanály:	8 kanálů
Výstupní rozsah:	$\pm 10$ V
Výstupní proud:	5 mA max.
Čas ustálení:	31 $\mu$ s

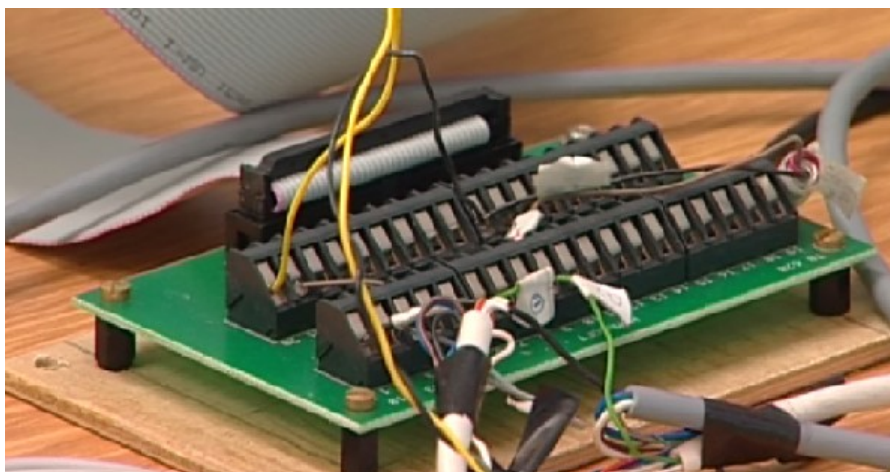
Nezbytnou součástí Měřicí karty MF 624 je svorkovnice TB 620 zobrazena na obr. 5.1 – 4. TB 620 je pasivní element, který umožňuje snadné připojení externích signálů (prvků) pomocí svorkovnice. K TB 620 je dodáván kabel pro připojení k měřicí kartě. Univerzální svorkovnice je číslována dle konektoru signálu. V **Real Time Toolbox** musí být k jednotlivým vstupním blokům Source Block Parameters a výstupním blokům Sink Block Parameters přiřazený jednotlivé kanály. Vstupní kanály jsou číslovány od 1 do 8 dle čísel na svorkovnici. U výstupních kanálů musíme být pozorní, protože nejsou číslované 20 až 25 a 10,11 jak je tomu na svorkovnici, ale opět od čísla 1 až 6 a 10,11.

Na obr. 5.1 – 3 jsou zobrazené jednotlivé kanály multifunkční vstupně – výstupní měřicí karty MF 624. Vstupní kanály označené AD0 až AD8 slouží pro analogové připojení snímačů. Kanál AGND slouží pro připojení uzemnění snímačů. Na vstupní kanály DA0 až DA7 se připojují jednotlivé akční prvky např. proporcionální rozváděč anebo proporcionální regulátor tlaku. Na kanál GND se připojí uzemnění jednotlivých

akčních prvků. Pro digitální vstupy se používají kanály DIN0 až DIN7 a pro digitální výstupy slouží DOUT0 až DOUT7.

AD0	1	20	DA0
AD1	2	21	DA1
AD2	3	22	DA2
AD3	4	23	DA3
AD4	5	24	DA4
AD5	6	25	DA5
AD6	7	26	-12V
AD7	8	27	+12V
AGND	9	28	+5V
DA6	10	29	GND
DA7	11	30	DOUT0
DIN0	12	31	DOUT1
DIN1	13	32	DOUT2
DIN2	14	33	DOUT3
DIN3	15	34	DOUT4
DIN4	16	35	DOUT5
DIN5	17	36	DOUT6
DIN6	18	37	DOUT7
DIN7	19		

Obr. 5.1-3 Jednotlivé kanály multifunkční karty MF 624



Obr. 5.1-4 TB 620 Univerzální svorkovnice

## 5.2 Snímač tlaku vzduchu

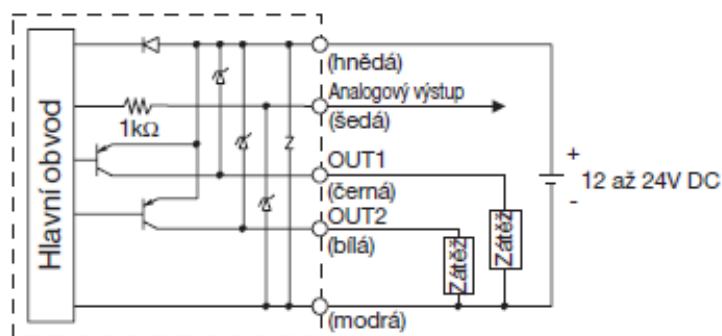
Jedná se o **elektronický tlakový snímač s displejem řady ISE 40 – 0,1 – 62L** od fy SMC, který je zobrazen na obr. 5.2 – 5.

Technické parametry snímače:

- Tlakový rozsah                      0,1 – 1 [MPa]
- Připojovací závit                    vnitřní závit G1/8
- Napájecí napětí                      12 – 24 [V DC]
- Výstupní signál                        1 – 5 [V]



Obr. 5.2-5 snímač tlaku ISE 40



Obr. 5.2-6 Schéma zapojení

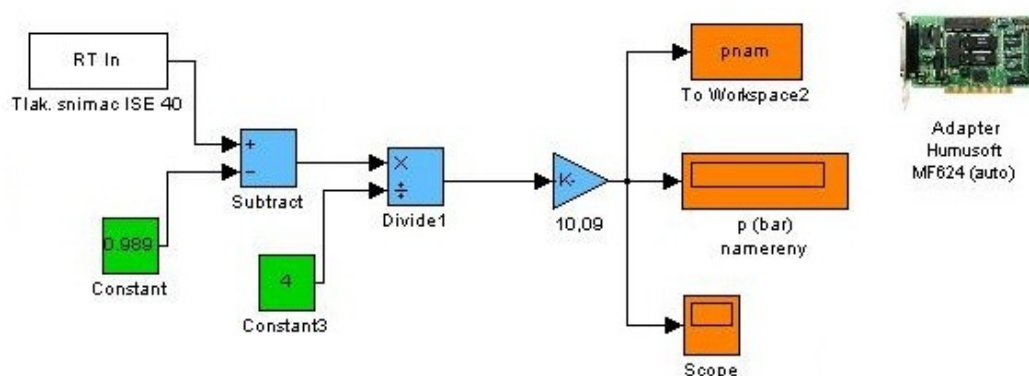
### Popis snímače

Tento snímač tlaku může měřit vzduch, nekorozivní a nehořlavé plyny. Vyžaduje napájení 12 až 24 V stejnosměrného napětí. Samostatný odběr proudu je velice malý maximálně 55 mA bez zátěže. Displej snímače může zobrazovat tlak v různých jednotkách např. kPa, MPa, Bar, Psi, atd. Na obr. 5.2 – 6 je znázorněné vnitřní zapojení snímače a označení vývodů. Vývody OUT1 a OUT2 slouží pro spínané výstupy, dolní a horní hranice dosaženého tlaku např. pro sepnutí kompresoru nebo jako signalizace nastaveného tlaku. Tyto výstupy mohou být zatížené pouze 80 mA a 30 V, proto se nehodí pro přímé spínání ale je zapotřebí tento signál zesílit patřičným zesilovačem. Analogový vodič slouží jako výstupní signál pro měřicí kartu. Výstupní napětí analogového výstupu nabývá hodnot od 1 do 5 V. Tento rozsah napětí je neobvyklý proto, že měřicí karty obvykle pracují v rozsahu napětí  $\pm 10$  V.

### Zapojení snímače včetně zapojení v prostředí Matlab Simulink

Snímač SMC se připojí na napájecí napětí laboratorního zdroje. Následně se připojí vodič výstupního signálu na svorku č. 2 svorkovnice a vodič uzemnění se připojí na svorku č. 9 svorkovnice měřicí karty. Tento snímač má výstupní napětí mezi 1 a 5 V. K tomuto rozsahu napětí odpovídá daný rozsah tlaků od 0 do 1 MPa. Měřicí karta, ale disponuje rozsahem napětí od 0 do 10 V, proto se musí daný signál upravit tak, aby v prostředí Simulinku zobrazoval správné hodnoty. Schéma obvodu v Simulinku je zobrazeno na obr. 5.2 – 7. Jednotlivé bloky obvodu jsou přidány z knihovny Simulink. Bloky následně propojíme a nastavíme konstanty na základní hodnotu potřebnou pro úpravu signálu. Bloky **Constant** a **Constant3** slouží pro úpravu signálu ze snímače tlaku vzduchu. Blok **Constant** je nastaven na hodnotu 1, protože snímač při nulovém tlaku dává napětí 1 V,

proto se hodnota musí odečíst blokem **Subtract**. Dále už upravený signál má maximální hodnotu 4 V, to odpovídá tlaku 1 MPa. Abychom obdrželi procentuální podíl tohoto tlaku, podělíme tuto hodnotu blokem **Divide1**. Blok **Constant3** je nastaven na hodnotu 4. Rozsah hodnot za blokem **Divide1** je 0 až 1 V. Pro přehlednost a aby hodnoty byly shodné se snímačem tlaku ISE 40, je tento rozsah hodnot zesílen desíti. Takto nastavené bloky umožňují zobrazení tlaku v barech. Do hotového schématu obvodu, přiřadíme z knihovny **Real Time Toolboxu** bloky **RT In** a **Adapter**. Po otevření bloku RT In se nastaví číslo kanálu, ke kterému je připojen signál ze snímače tlaku. Dále se nastaví správná cesta bloku **Adapter**, tak aby se daný blok spojil s multifunkční vstupně – výstupní měřicí kartou MF 624. Poté se na daném bloku zobrazí popis **Adapter HUMUSOFT MF 624 (auto)**.



Obr. 5.2-7 Model se snímačem ISE 40 v Matlab Simulink

### Ladění snímače tlaku

Připojíme snímač tlaku k pneumatickému obvodu a zdroji napájecího napětí. Pneumatický obvod je sestaven z digitálního snímače tlaku SMC ISE 40 a ručního redukčního ventilu s manometrem LR – 1/8 – S od firmy FESTO. Oba prvky jsou připojeny na zdroj tlaku v laboratoři pneumatických prvků. Za tyto prvky ještě připojíme uzavírací ventil, aby nedocházelo ke zbytečnému úniku vzduchu do atmosféry.

Po spuštění programu Matlab – Simulink se otevře obvod pro zkoušení snímače tlaku. Po zapnutí napájení snímače tlaku se zobrazí na displeji hodnota tlaku, kterou nastavujeme ručním redukčním ventilem. Zobrazovaný tlak na snímači ISE 40 musí souhlasit s hodnotou v Simulinku. Pokud tomu tak není, tak se příslušné konstanty upravují do té doby, než se alespoň přiblížíme hodnotě zobrazené na snímači ISE 40. V případě snímače ISE 40 se hodnota liší v řádu několik setin bar. Takto odzkoušený snímač ISE 40 je připraven pro následný experiment.



### 5.3 Snímač průtoku vzduchu

Průtok protékajícího média je měřen **hlídačem spotřeby tlakového vzduchu SD 6000** od fy ifm electronic, který je zobrazen na obr. 5.3 – 8.

Technické parametry:

- Rozsah měřeného průtoku  $0 - 1250 [l_N \cdot \text{min}^{-1}]$
- Připojovací rozměry vnější závit G1/2
- Napájecí napětí  $19 - 30 [V]$
- Výstupní signál  $4 - 20 [mA]$



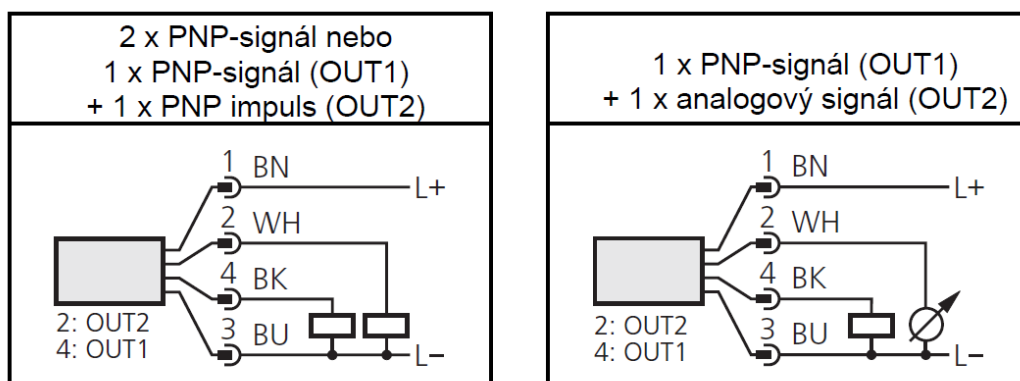
Obr. 5.3-8 Snímač průtoku SD 6000

#### Popis snímače

Tento snímač průtoku měří vzduch, ve kterém prachové částice nesmí překročit  $1 \mu\text{m}$  a maximální obsah oleje může činit  $0,01 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Snímač se napájí stejnosměrným napětím 19 až 30 V. Maximální hodnota odběru proudu snímače je 180 mA. Displej snímače zobrazuje okamžitou spotřebu vzduchu, která může být zobrazena buď  $l_N \cdot \text{min}^{-1}$  nebo v  $\text{m}_N^3 \cdot \text{hod}^{-1}$ . Tyto hodnoty průtoky jsou přepočteny na normovaný objemový průtok podle ISO 2533, tzn. objemový průtok při 1013 kPa, 15°C. Na obr. 5.3 – 9 je znázorněno vnitřní zapojení snímače a označení vývodů. Hlídač spotřeby tlakového vzduchu může být zapojen dvěma způsoby, buď spíná dvě hodnoty průtoku minimální a maximální. Druhý způsob může spínat jednu hodnot průtoku a druhý vodič zapojíme do měřicí karty pro snímání hodnoty průtoku. Spínané výstupu lze zatížit maximálně hodnotou 250 mA, proto nejsou vhodné pro přímé spínání průtoku, ale musí být patřičně signál zesílen zesilovačem. V našem případě používáme druhý způsob, kde vodič analogového signálu zapojíme do měřicí karty a spínaný vodič nepoužíváme. Analogový signál má proudový výstup od 4 do 20 mA. Tomuto rozsahu proudu, lze nastavit maximální rozsah průtoku od 0 do  $(313 \div$



1250)  $I_N \cdot \text{min}^{-1}$ . V případě tohoto měření je výstupní hodnota signálu nastavena od 0 do  $350 I_N \cdot \text{min}^{-1}$ .



Barvy vodičů u *ifm*-kabelových konektorů:  
 1 = BN (hnědá); 2 = WH (bílá)  
 3 = BU (modrá); 4 = BK (černá);

Obr. 5.3-9 Schéma zapojení snímače průtoku

### Zapojení snímače včetně zapojení v prostředí Matlab Simulink:

Snímač průtoku vzduchu se jako v předchozím případě připojí na zdroj napájecího napětí laboratorního zdroje. Následně připojíme vodič signálu na svorku č. 3 a vodič uzemnění se připojí na svorku č. 9 svorkovnice měřicí karty. Tento snímač nemá napěťový výstupní signál jak je tomu u snímače tlaku, ale výstupní signál má proudový. Měřicí karta disponuje pouze napěťovými vstupy a výstupy, proto není možné průtokoměr připojit. Proudový výstup průtokoměru vzduchu se musí upravit na napěťový signál. Napěťový signál získáme, když na výstupní vodiče připojíme paralelně odpor. Tento odpor musí být pečlivě zvolen, tak aby nedošlo ke zkratu na řídicí kartě v počítači. Hodnota odporu je experimentálně navržena na  $300 \Omega$  a následně přepočítaná viz níže.  $U_{\max}$  nesmí překročit hodnotu napětí na měřicí kartě.

#### Výpočet výstupního signálu

$$I = 4 - 20 \text{ mA}$$

$$R = 300 \Omega$$

$$U = ?$$

$$I = \frac{U}{R} \Rightarrow U = I \cdot R \quad (5.3-1)$$

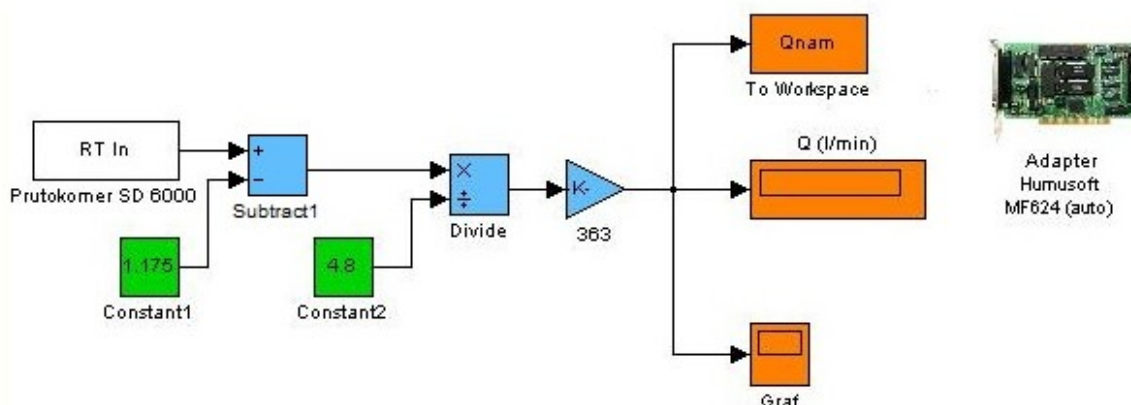
$$U_{\min} = 0,004 \cdot 300 = 1,2 \text{ V}$$

$$U_{\max} = 0,02 \cdot 300 = 6 \text{ V}$$

Musí platit  $U_{karty} \geq U_{max}$

$10 \geq 6$  podmínka vyhovuje, zvolený odpor  $300 \Omega$  se může použít pro následné měření.

Hodnoty  $U_{min}$  a  $U_{max}$  se následně použijí pro úpravu signálu v Matlabu – Simulinku. Schéma obvodu v Simulinku je na obr. 5.3 – 10. Obvod je sestaven z jednotlivých bloků, které jsou navzájem propojeny. Konstanta **Constant1** je použita z výpočtu a má hodnotu 1,2. Průtokoměr vzduchu dává při nulovém průtoku vzduchu 1,2 V, proto se musí tato hodnota odečíst blokem **Subtract1**. Za blokem **Subtract1** je maximální hodnota 4,8 V. Pro získání procentuálního podílu průtoku vzduchu podělíme tuto hodnotu blokem **Divide**. Blok **Constant2** nastavíme na hodnotu 4,8. Rozsah hodnot za blokem **Divide** je 0 až 1. Pro zobrazení stejné hodnoty průtoku vzduchu v Matlabu jakou zobrazuje průtokoměr vzduchu, zesílíme tento rozsah hodnotou 350. Přiřadíme z knihovny **Real Time Toolboxu** bloky **RT In** a **Adapter**. Po otevření bloku RT In se nastaví číslo kanálu vstupu, ke kterému je připojen signál z průtokoměru vzduchu. Dále Adapter musí být přiřazen do schématu Simulinku a správně nastavená jeho cesta k hardwaru.



Obr. 5.3-10 Model se snímačem SD 6000 v Matlab Simulink

### Ladění snímače průtoku

Připojíme snímač spotřeby vzduchu k pneumatickému obvodu. Pneumatický obvod je sestaven s hlídače spotřeby tlakového vzduchu SD 6000 a ručního škrticího ventilu od firmy FESTO. Škrtící ventil je připojen před snímač průtoku. Oba prvky jsou připojeny na zdroj tlakového vzduchu v laboratoři pneumatických prvků. Prvky mezi sebou propojíme hadičkami o světlosti 8 mm.

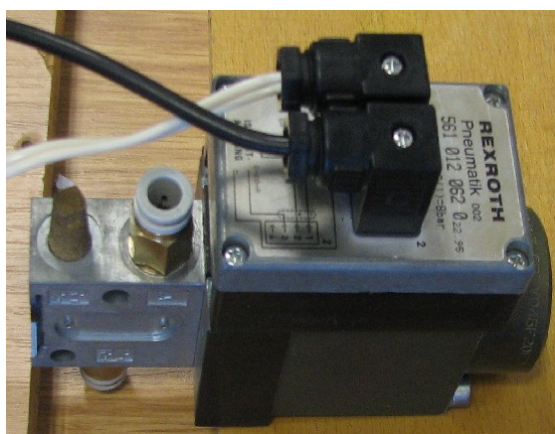
Po spuštění programu Matlab Simulink otevřeme obvod pro zkoušení snímače průtoku vzduchu. Po zapnutí napájení snímače průtoku se zobrazí na displeji hodnota průtoku vzduchu, škrtkící ventil je uzavřen. Displej zobrazuje nulový průtok a v Simulinku musí taktéž zobrazit nulu. Pokud tomu tak není, nastavíme příslušné konstanty, tak abychom nastavili spodní hodnotu průtoku na nulovou hodnotu. Potom začneme pomaličku otevírat ruční škrtkící ventil a zároveň sledujeme jak displej, tak hodnotu v Simulinku. Škrtkící ventil otevřeme, tak aby maximální hodnota průtoku nepřesáhla  $350 \text{ l}_N \cdot \text{min}^{-1}$ . Pokud se hodnota neshoduje, tak se opět musí provést korekce příslušných konstant v Simulinku. Tento postup opakujeme tak dlouho, dokud se hodnoty nepřiblíží do určité tolerance. V případě snímače SD 6000 se hodnota lišila o několik  $\text{l}_N \cdot \text{min}^{-1}$ . Takto odzkoušený snímač SD 6000 je připraven pro následný experiment.

## 5.4 Proporcionální regulátor tlaku

Konstantní tlak v obvodu udržuje **elektropneumatický regulátor tlaku s proporcionálním magnetem 561 012 NW 4** od fy Rexroth Mannesmann pneumatik, který je zobrazen na obr. 5.4 – 11.

Technické parametry:

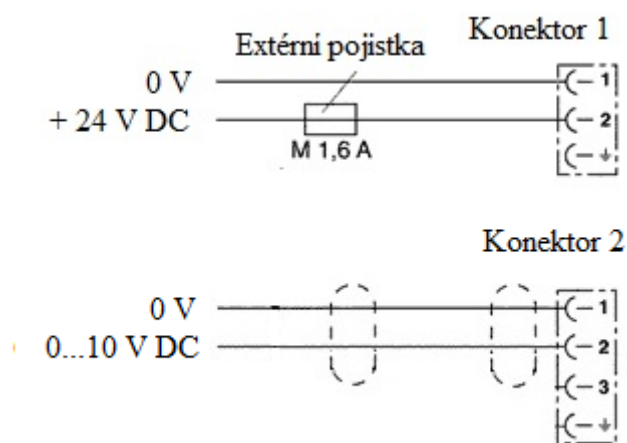
- |                             |  |
|-----------------------------|--|
| - Rozsah regulovaného tlaku | 0 – 0,6 [MPa]                              |
| - Připojovací rozměry       | vnitřní závit G1/8                         |
| - Napájecí napětí           | 24 [V]                                     |
| - Vstupní signál            | 0 – 10 [V]                                 |
| - Maximální průtok          | 350 [ $\text{l}_N \cdot \text{min}^{-1}$ ] |



Obr. 5.4-11 Elektropneumatický regulátor tlaku s proporcionálním magnetem

## Popis regulátoru tlaku

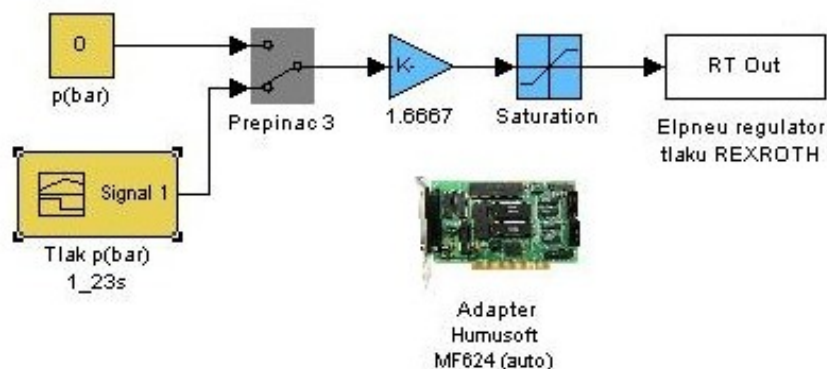
Tento elektropneumatický regulátor tlaku se používá na stlačený vzduch, který musí být zbaven oleje. Vyžaduje napájení  $24\text{ V} \pm 10\%$  stejnosměrného napětí. Odběr proudu činí maximálně 1,2 A. Na obr. 5.4 – 12 jsou znázorněny dva konektory. Konektor 1 slouží pro napájení regulátoru tlaku a konektor 2 slouží pro jeho regulaci na požadovanou hodnotu. Žádaná hodnota se zadává napětím, které nabývá hodnot od 0 do 10 V. Rozsah této hodnoty odpovídá rozsahu požadovaného tlaku od 0 do 6 bar. Tento regulátor tlaku je řízen analogovým signálem z měřicí karty.



Obr. 5.4-12 Elektrické schéma zapojení regulátoru tlaku

## Zapojení regulátoru tlaku včetně zapojení v prostředí Matlab Simulink

Regulátor tlaku se připojí na napájecí napětí laboratorního zdroje. Následně se připojí vodič vstupního signálu na svorku č. 10 svorkovnice a vodič uzemnění se připojí na svorku č. 29 svorkovnice měřicí karty. Tento regulátor tlaku má vstupní napětí mezi 0 až 10 V. K tomuto rozsahu napětí odpovídá daný rozsah tlaků od 0 do 0,6 MPa. Měřicí karta disponuje stejným rozsahem napětí od 0 do 10 V, proto se daný signál už nemusí upravovat jak tomu je u předchozích snímačů. Schéma obvodu v Simulinku je zobrazeno na obr. 5.4 – 13. Jednotlivé bloky obvodu jsou přidány z knihovny Simulink. Pozornost se musí věnovat bloku **Saturation** tento blok určuje meze signálu, které se nastaví od 0 do 10. Takto nastavený blok nepovolí překročit nastavenou výstupní hodnotu. Bloky následně propojíme. Do hotového schématu obvodu, přidáme z knihovny **Real Time Toolboxu** bloky **RT Out** a **Adapter**. Po otevření bloku RT Out se nastaví číslo kanálu, ke kterému je připojen signál z regulátoru tlaku. Dále se nastaví správná cesta bloku Adapter tak, aby se daný blok spojil z měřicí a řídicí kartou MF624.



Obr. 5.4-13 Model s regulátorem tlaku 561 012 NW 4 v Matlab Simulink

### Ladění regulátoru tlaku

Připojíme regulátor tlaku vzduchu k pneumatickému obvodu. Pneumatický obvod je sestaven s elektropneumatického regulátoru tlaku s proporcionálním magnetem 561 012 NW 4 a elektronický tlakový snímač s displejem řady ISE 40 – 0,1 – 62L. Oba prvky jsou připojeny na zdroj tlakového vzduchu v laboratoři pneumatických prvků. Prvky mezi sebou jsou propojeny hadičkami o světlosti 8 mm. Výstup z regulátoru tlaku se zaslepí, aby nedocházelo ke zbytečnému úniku vzduchu do atmosféry.

Po spuštění programu Matlab – Simulink otevřeme obvod pro zkoušení regulátoru tlaku vzduchu. Zapneme napájení regulátoru tlaku a elektronického snímače tlaku vzduchu. Po otevření hlavního ventilu přívodu vzduchu se na displeji snímače zobrazí nula proto, že v základní poloze je regulátor tlaku uzavřený a výstupní kanál má propojený s odvodušněním. V Simulinku nastavíme různé hodnoty tlaku, které se postupně zobrazují na displeji snímače tlaku vzduchu. Takto odzkoušený regulátor tlaku NW 4 je připraven pro následný experiment.

## 5.5 Proporcionální rozváděč

Pro spojitě řízení průtoku je použit **proporcionální rozváděč MPYE – 5** od fy FESTO, který je zobrazen na obr. 5.5 – 14.

Technické parametry:

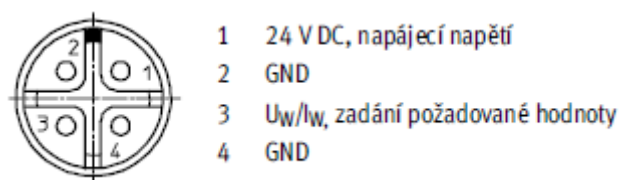
- |                      |  |
|----------------------|--|
| - Maximální průtok   | 350 [ l <sub>N</sub> · min <sup>-1</sup> ] |
| - Připojovací rozměr | vnitřní závit G1/8                         |
| - Napájecí napětí    | 17 – 30 [V]                                |
| - Vstupní signál     | 0 – 10 [V]                                 |



Obr. 5.5-14 Proporcionální rozvaděč MPYE – 5

### Popis proporcionálního rozvaděče

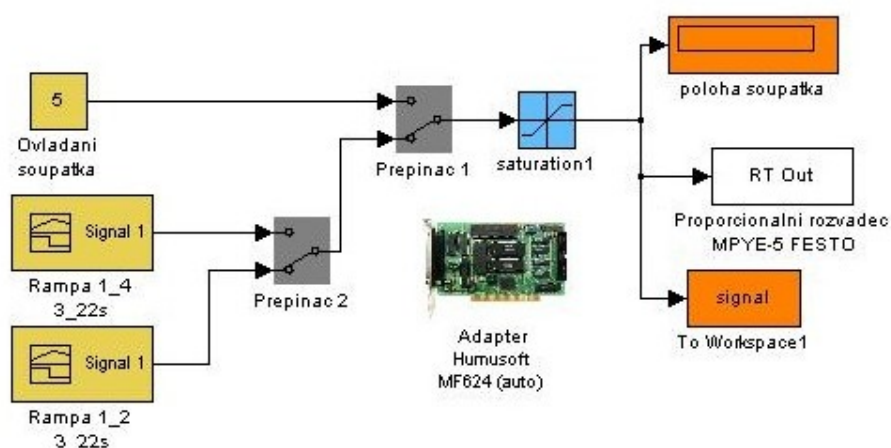
Proporcionální rozváděč je pěticestný, třípolohový se střední polohou uzavřenou. Tento proporcionální rozváděč se používá na stlačený vzduch, ze kterého musí být odstraněn olej. Je za potřeby aby vzduch, který proudí rozváděčem byl filtrován na hodnotu 5 µm. Napájí se stejnosměrným napětím v rozsahu 17 až 30 V. Odběr proudu je závislý od polohy šoupátka. Střední poloha vyžaduje nejmenší spotřebu proudu, který činí 100 mA. Při maximálním vychýlení šoupátka je odběr proudu 1100 mA. Na obr. 5.5 – 15 je znázorněný konektor rozvaděče MPYE – 5 a označení pinu výstupních vodičů. Žádaná hodnota se zadává rozsahem napětí, které činí 0 – 10 V. Střední poloha šoupátka je dosažena při hodnotě 5 V. Proporcionální rozváděč je řízen analogovým signálem z měřicí karty. Hodnoty od 5 do 0 V zajišťují průtok z přípoje 1 do 2, přičemž 4 je odvětráno do výfuku 5. Hodnoty od 5 do 10 V pak zajišťují průtok z přípoje 1 do 4, přičemž 2 je odvětráno do výfuku 3.



Obr. 5.5-15 Konektor rozváděče MPYE-5

### Zapojení proporcionálního rozváděče včetně zapojení v prostředí Matlab Simulink

Proporcionální rozváděč se připojí na napájecí napětí laboratorního zdroje, jmenovité napětí činí 24 V. Následně se připojí vodič vstupního signálu na svorku č. 20 svorkovnice a vodič uzemnění se připojí na svorku č. 29 svorkovnice měřící karty. Tento proporcionální rozváděč má vstupní napětí mezi 0 až 10 V. Střední poloha je dosažena při 5 V řídicího napětí. Měřící karta disponuje stejným rozsahem napětí od 0 do 10 V, proto se daný signál už nemusí upravovat jak tomu je u předchozích snímačů. Schéma obvodu v Simulinku je zobrazeno na obr. 5.5 – 16. Jednotlivé bloky Obvodu jsou přidány z knihovny Simulink. Pozornost se musí věnovat bloku **Saturation** tento blok určuje meze signálu, které se nastaví od 0 do 10. Takto nastavený blok nepovolí překročit nastavenou výstupní hodnotu. Bloky následně propojíme. Do hotového schématu obvodu, přidáme z knihovny **Real Time Toolboxu** bloky **RT Out** a **Adapter**. Po otevření bloku RT Out se nastaví číslo kanálu, ke kterému je připojen signál z regulátoru tlaku. Dále se nastaví správná cesta bloku Adapter, tak aby se daný blok spojil z měřicí a řídicí kartou MF 624.



Obr 5.5-16 Model s proporcionálním rozváděčem MPYE-5 v Matlab-Simulink

## **Ladění proporcionálního rozváděče**

Připojíme proporcionální rozváděč vzduchu k pneumatickému obvodu. Pneumatický obvod je sestaven s proporcionálním rozváděčem MPYE – 5 a hlídačem spotřeby tlakového vzduchu SD 6000. Oba prvky jsou připojeny na zdroj tlakového vzduchu v laboratoři pneumatických prvků. Prvky mezi sebou jsou propojeny hadičkami o světlosti 8 mm. Proporcionální rozváděč má dva výstupy, které se budou zkoušet jednotlivě, proto hadička mezi jednotlivými výstupy se bude přepojovat.

Po spuštění programu Matlab – Simulink otevřeme obvod pro zkoušení proporcionálního rozváděče. Zapneme napájení proporcionálního rozváděče a průtokoměru vzduchu SD 6000. Po otevření hlavního ventilu přívodu vzduchu se na displeji průtokoměru zobrazí minimální průtok vzduchu. Rozváděč je ve střední poloze uzavřen, ale šoupátko kmitá a má nepatrnou mezeru mezi šoupátkem a tělesem rozváděče, to způsobuje malou spotřebu vzduchu. V Simulinku nastavíme různé hodnoty vychýlení šoupátka v rozsahu od 0 do 10 V. Hodnoty od 5 do 0 V zajišťují průtok z přípoje 1 do 2. Potom je zapotřebí propojit hadičku do výstupu 4 a odzkoušíme druhý výstup, který odpovídá hodnotám od 5 do 10 V. Takto odzkoušený proporcionální rozváděč MPYE – 5 je připraven pro následující experiment.



## 6. Experiment pneumatických prvků

Z předchozí kapitoly jsem si připravil prvky pro experiment, ve kterém se ověří různé vlastnosti proporcionálních prvků. Experiment se zabývá, jak proporcionálním prvkem pro řízení průtoku vzduchu, tak i prvkem pro regulaci tlaku vzduchu. V laboratoři pneumatických prvků je sestaven funkční pneumatický obvod pro řízení průtoku a tlaku vzduchu. Obvod je sestaven ze snímače tlaku a průtoku vzduchu. Následující dva prvky obvodu jsou, elektropneumatický regulátor tlaku s proporcionálním magnetem a proporcionální rozváděč. Tyto prvky slouží pro regulaci tlaku a průtoku vzduchu. Oba tyto proporcionální prvky jsou řízeny pomocí řídicí karty v počítači.

### 6.1 Propojení prvků

V laboratoři pneumatických prvků je sestaven model pneumatického obvodu. Model je zaměřen na zkoušení proporcionálního rozváděče a zkoušení proporcionálního regulátoru tlaku vzduchu. Přívod proporcionálního rozváděče a regulátoru tlaku vzduchu je napojen hadicí na filtr s odlučovačem kondenzátu na výstupu z kompresoru. S ohledem na proporcionální rozváděč je požadovaná filtrační schopnost 5  $\mu\text{m}$ .

Z výstupu filtru je napojen regulátor tlaku vzduchu, za ním následuje snímač tlaku, který se připojí paralelně těsně před proporcionální rozváděč, za proporcionální rozváděč se připojí průtokoměr vzduchu. Proporcionální rozváděč je připojen pouze na jeden z výstupu. V průběhu měření se výstupy propojují ručně. Tlakový regulátor vzduchu má za úkol udržet konstantní tlak po celou dobu měření a to i při proměnlivém odběru vzduchu. Regulátor tlaku vzduchu je konstruován tak, že bez řídicího signálu nebo ve vypnutém stavu má přívod vzduchu uzavřen, a proto v tomto měření regulátor tlaku vzduchu plní ještě funkci hradící, tzv. nemusí se neustále pouštět a zastavovat přívod vzduchu ručně.

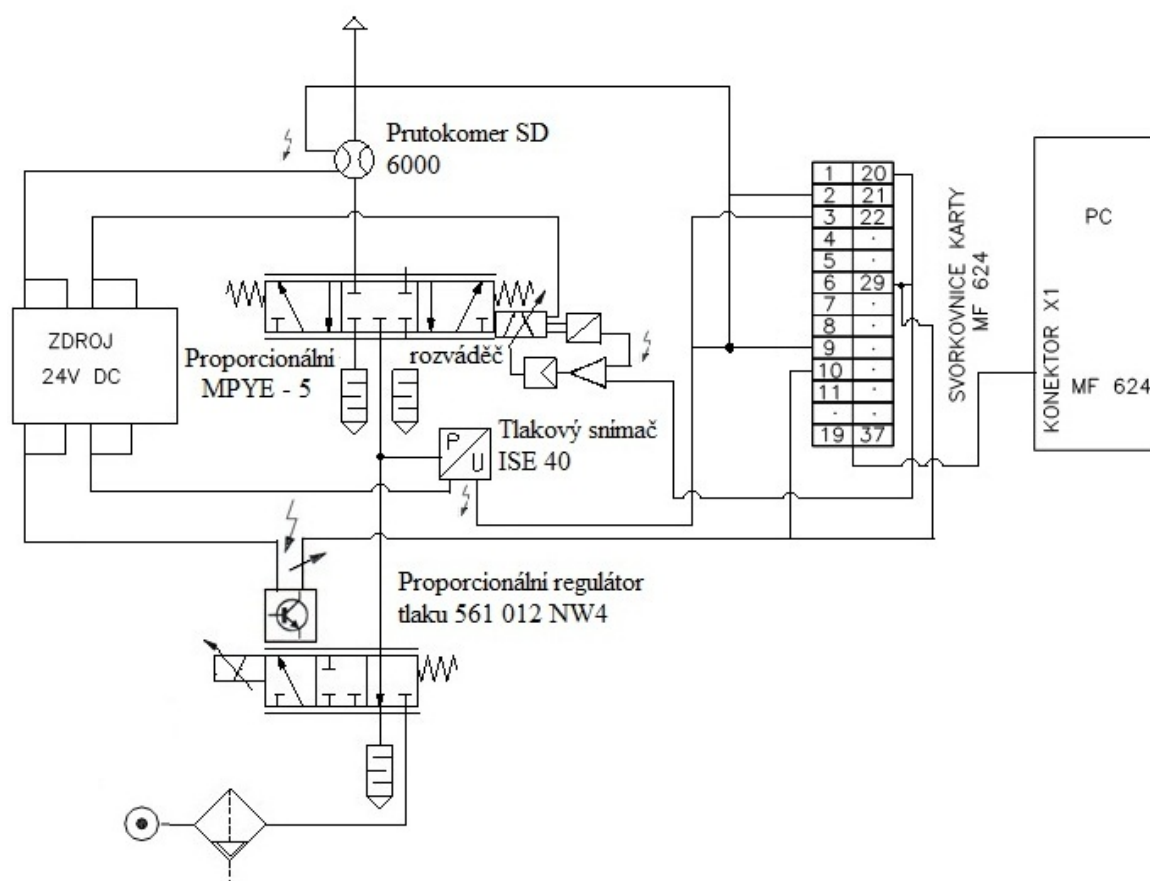
Veškeré prvky jsou propojeny hadicemi o průměru 8 mm, pouze snímač tlaku je připojen přes redukci na hadičku o průměru 4 mm.

Veškeré prvky vyžadují stejnosměrné napájení. V tomto experimentu nepostačoval jeden zdroj stabilizovaného napětí, ale jsou použity dva zdroje, ke kterým se připojí

veškeré prvky obvodu. V předchozích podkapitolách je popsáno zapojení na jednotlivé svorky měřicí karty a zapojení na laboratorní zdroje.

## 6.2 Postup měření

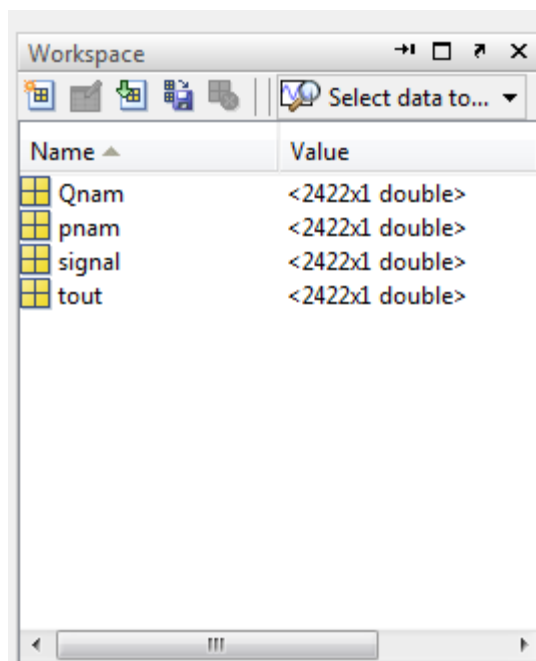
Po sestavení pneumatického obvodu, které je zobrazeno na obr. 6.2 – 1 a připojení na zdroje stabilizovaného napětí a po otevření přívodu vzduchu se spustí Matlab – Simulink. V Simulinku se otevře soubor `mereni_proporcu.mdl`. Daný soubor je zobrazen v příloze P 12. Model je sestaven, tak aby veškeré zpracované data v průběhu měření byly průběžně ukládány. Uložení dat pomocí tabulky Excel umožňuje blok **To Workspace**. Hodnoty se ukládají do základního okna Matlabu obr. 6.2 – 3 a následně se importují do softwaru Microsoft Office Excel. Každá uložená hodnota se importuje do Excelu zvlášť. Část tabulky je zobrazena v tab. 6.2 – 2.



Obr. 6.2-1 Schéma obvodu včetně zapojení do svorkovnice MF 624

t [s]	Q [l <sub>N</sub> · min <sup>-1</sup> ]	p [bar]	signál [V]
6,60	124,85	2,48	3,00
6,61	128,27	2,76	2,99
6,62	125,50	2,64	2,99
6,63	129,01	2,60	2,98
6,64	130,39	2,64	2,98
6,65	128,45	2,69	2,97
6,66	129,28	2,47	2,97
6,67	129,37	2,54	2,96
6,68	130,02	2,40	2,96
6,69	130,58	2,46	2,95
6,70	133,71	2,45	2,94
6,71	130,85	2,53	2,94
6,72	134,91	2,49	2,93
6,73	134,82	2,39	2,93
6,74	137,13	2,55	2,92
6,75	137,50	2,47	2,92
6,76	135,01	2,56	2,91
6,77	135,38	2,53	2,91
6,78	135,38	2,54	2,90
6,79	136,02	2,44	2,89
6,80	136,21	2,48	2,89
6,81	136,30	2,52	2,88
6,82	141,10	2,63	2,88

Tab. 6.2-2 Importované hodnoty z Microsoft Office Excel

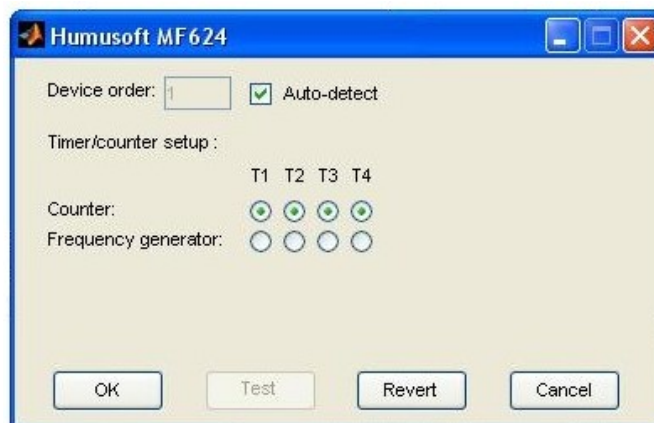


Obr. 6.2-3 Okno Workspace

## 6.2.1 Měření č. 1

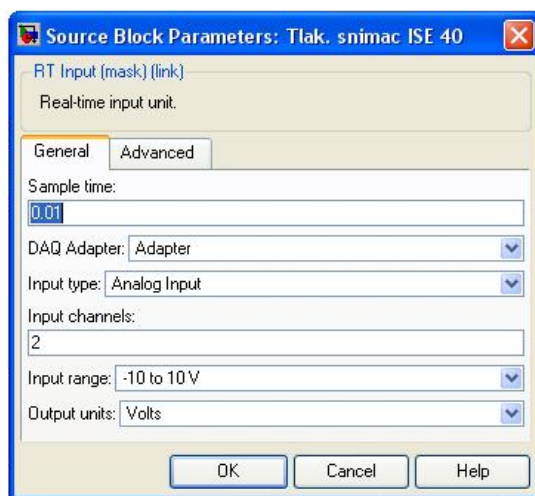
### Nastavení jednotlivých bloků v prostředí Matlab – Simulink

V souboru „mereni\_proporcu.mdl“ se provede nastavení bloků **Adapter**, **RT In**, **RT Out**. Na obr. 6.2.1 – 4 je blok nastavení pro multifunkční vstupně výstupní měřicí kartu Humusoft MF 624.

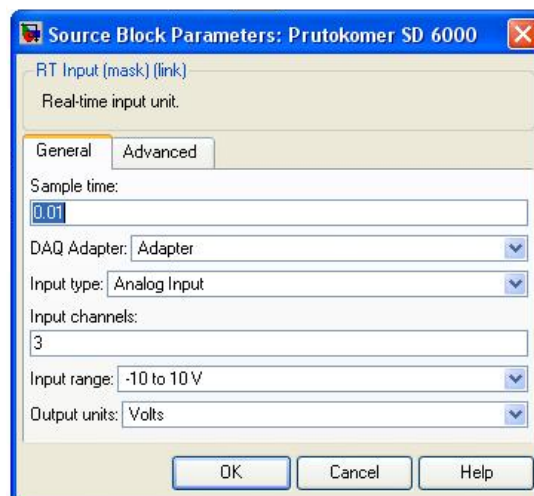


Obr. 6.2.1-4 Nastavení měřicí karty Humusoft 624

Na obr. 6.2.1 – 5 a 6 je blok nastavení pro vstupní parametry snímačů tlaku ISE 40 a průtokoměru vzduchu SD 6000. Jedná se o nastavení jednotlivých vstupních kanálů na, které jsou připojeny jednotlivé snímače. Nastavení analogového vstupního signálu a rozsah vstupního napětí.

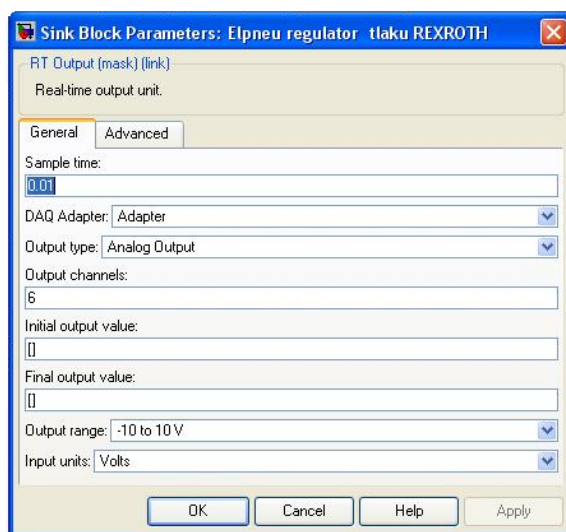


Obr. 6.2.1-5 Nastavení ISE 40

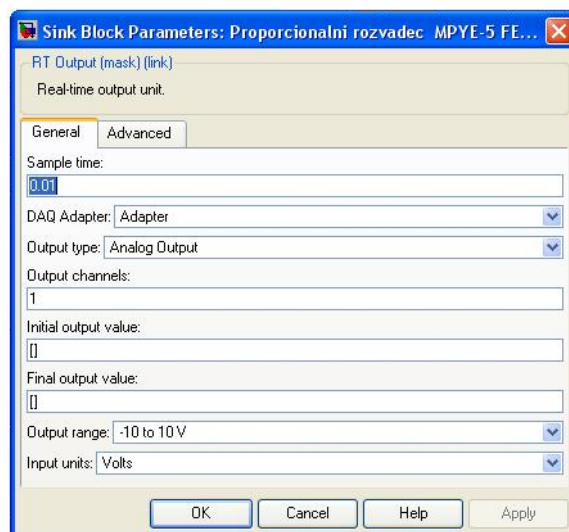


Obr. 6.2.1-6 Nastavení SD 6000

Na obr. 6.2.1 – 7 a 8 je blok nastavení pro výstupní parametry proporcionálního rozváděče MPYE – 5 a elektropneumatického regulátoru tlaku s proporcionálním magnetem 561 012 NW4.

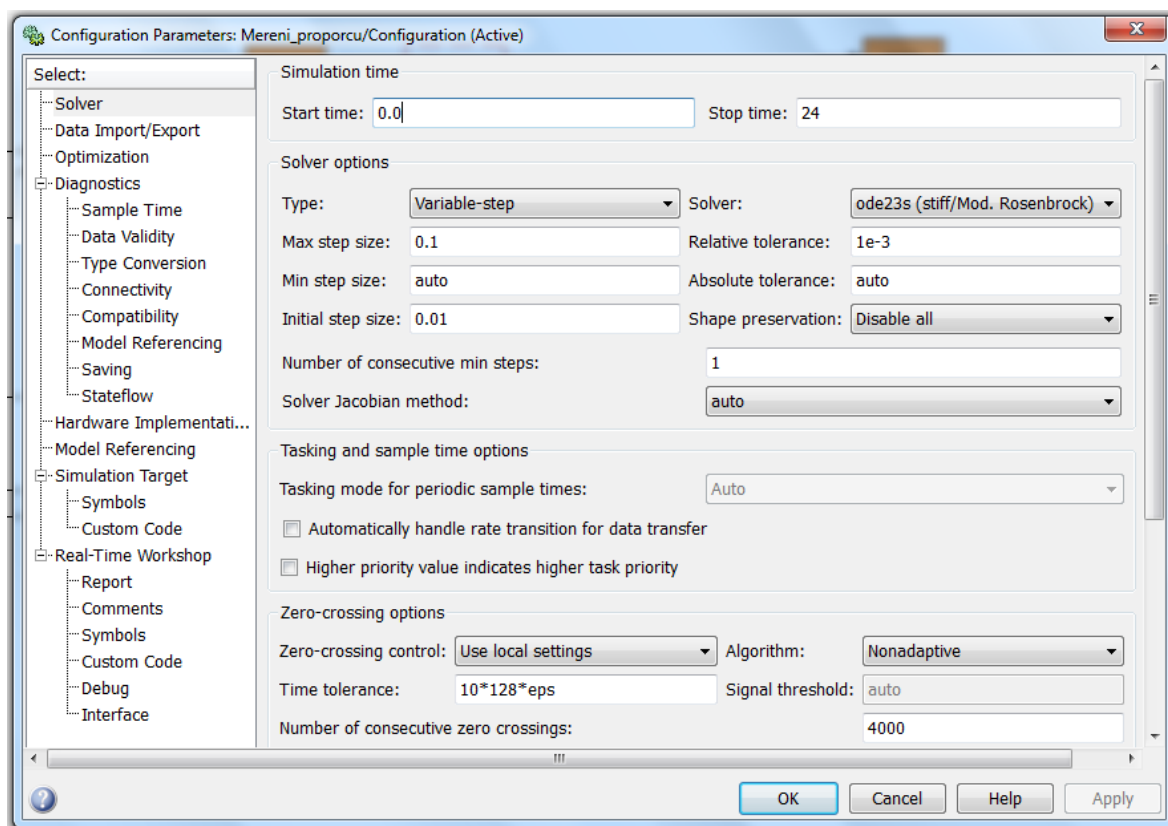


Obr. 6.2.1-7 Nastavení 561 012 NW4



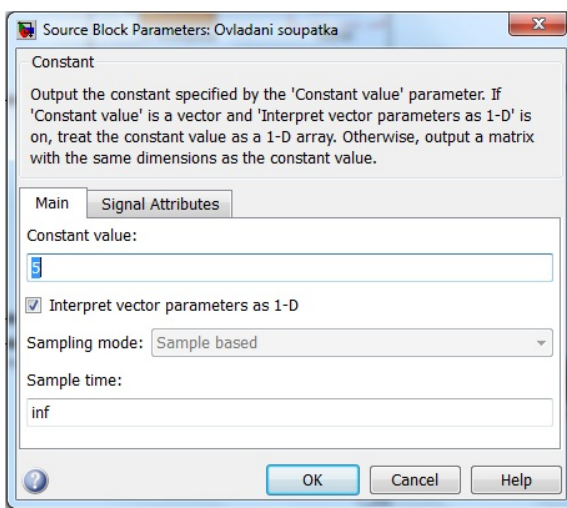
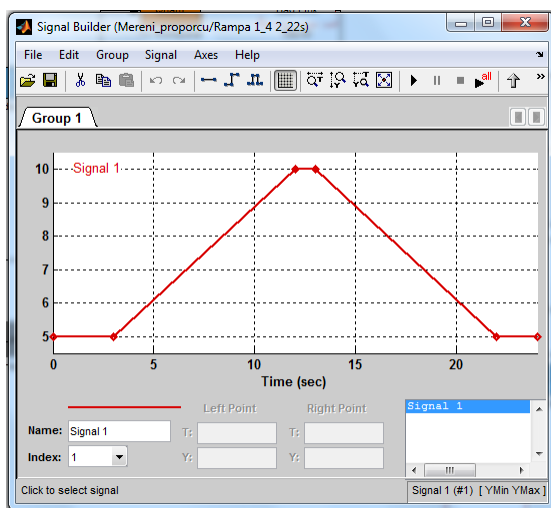
Obr. 6.2.1-8 Nastavení MPYE – 5

Doba měření se nastaví v bloku Configuration Parameters. Na obr. 6.2.1 – 9 je nastavená doba simulace (Stop time) 24 s.



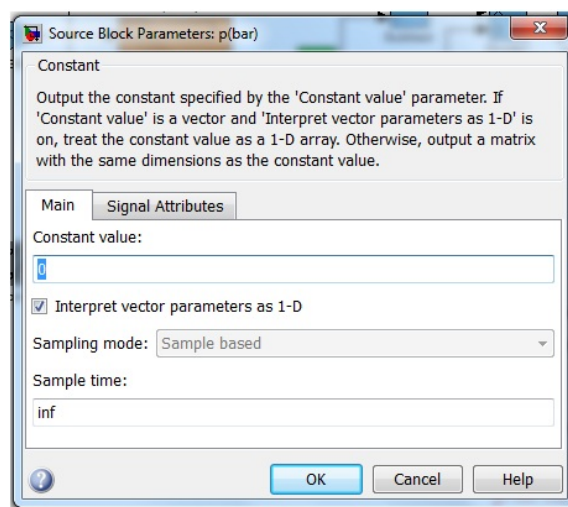
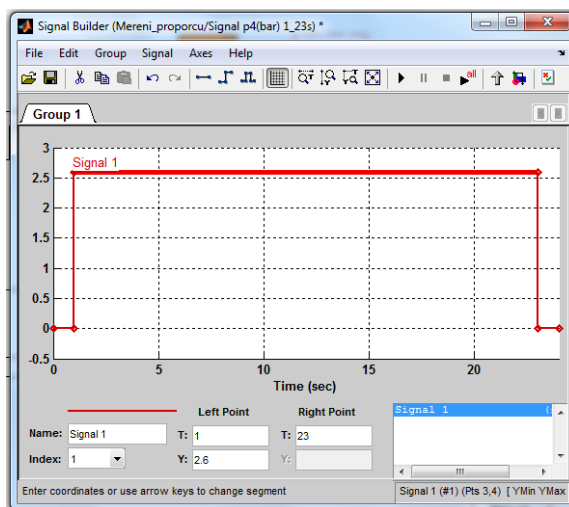
Obr. 6.2.1-9 Nastavení doby měření

Nastavení průběhu výstupního signálu pro proporcionální rozváděč MPYE – 5 je na obr. 6.2.1 – 10. Signál nastavený v bloku **Signal Builder** má tvar rampové funkce. Pomocí Přepínače č. dvě lze přepínat mezi jednotlivými signály vychýlení šoupátka proporcionálního rozváděče. Přepínač č. jedna slouží pro přepínání mezi blokem **Source Block Parameters** a **Signal Builder**. Na následujícím obr. 6.2.1 – 11 je **Source Block Parameters** ve kterém se může ručně nastavit jakákoliv poloha šoupátka proporcionálního rozváděče MPYE – 5.



Obr. 6.2.1-10 Nastavení signálu MPYE-5      Obr. 6.2.1-11 Nastavení konstanty MPYE-5

Nastavení výstupního signálu pro proporcionální regulátor tlaku 561 012 NW4 je na obr. 6.2.1 – 12. V bloku **Signal Builder** je nastavený průběh výstupního tlaku vzduchu. Signál je nastaven na konstantní hodnotu 2,6 bar po dobu 22 sekund. Přepínač č. 3 slouží pro přepínání mezi bloky **Source Block Parameters** a **Signal Builder**. Hodnotu tlaku lze také nastavit přímo v bloku **Source Block Parameters** obr. 6.2.1 – 13.



Obr. 6.2.1-12 Nastavení signálu 561012NW4      Obr. 6.2.1-13 Nastavení konstanty NW4

## **Spuštění experimentu**

Po zapnutí zdrojů a spuštění souboru v Simulinku se spustí měření, které probíhá automaticky. Celková doba pro měření je zvolena 24 sekund, ale rozváděč začne otvírat až ve 3 sekundě a k úplnému opětovnému zavření dojde ve 22 sekundě. Regulátor tlaku vzduchu pustí vzduch do obvodu v 1 sekundě a přívod vzduchu uzavře ve 23 sekundě. Celková doba měření je delší proto, že v jednom kroku dochází jak k maximálnímu vychýlení šoupátka na jednu stranu, tak k jejímu opětovnému vracení do střední polohy. Při maximální vychýlení se šoupátko zastaví na 1 sekundu pro ustálení proudícího vzduchu, pak se opět vrací do základní polohy. Po skončení doby měření se musí ručně přepojit hadička do druhého výstupu v rozváděči. Po přepojení hadičky se opět spustí měření, ale pro druhý výstup rozváděče.

Na základě rampové funkce pro vychýlení šoupátka proporcionálního rozváděče MPYE – 5 ze střední polohy do krajní a zpět obdržíme hysterezní křivku. Grafy závislosti průtoku vzduchu na signálu otevření jsou zobrazeny v příloze P 1 a P 2.

V příloze P 1 je graf závislosti průtoku vzduchu na vychýlení šoupátka z přípoje 1 do 2. V příloze P 2 je opět graf závislosti průtoku vzduchu na vychýlení šoupátka, ale z přípoje 1 do 4. Z grafu je zřejmá hystereze proporcionálního rozváděče MPYE – 5, která je velice malá, obě křivky jsou těsně vedle sebe, až se vzájemně překrývají. Z obou přiložených grafů je také zřejmé, že průtok vzduchu z přípoje 1 do 2 je větší než průtok z přípoje 1 do 4. Tento rozdíl je způsobený nesouměrnou konstrukcí proporcionálního rozváděče MPYE – 5.

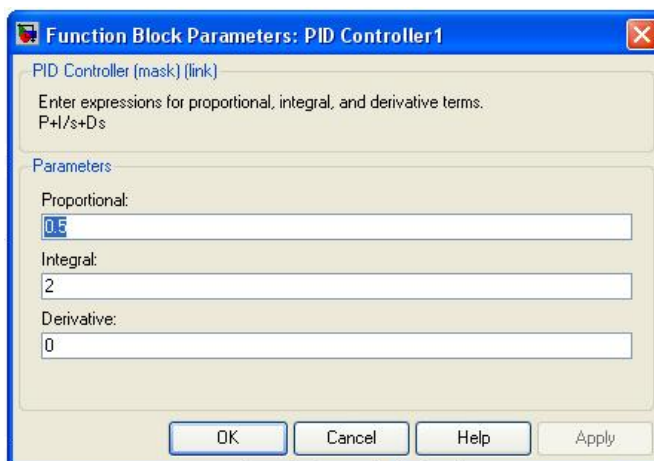
Elektropneumatický regulátor tlaku vzduchu s proporcionálním magnetem 561 012 NW 4 nepostačuje udržet konstantní tlak v obvodu, který je nastaven na hodnotu 0,26 [MPa], ale dochází k poklesu tlaku vzduchu na hodnotu 0,2 [Mpa]. Znázorněný průběh poklesu tlaku vzduchu je zobrazen v příloze P 3. Tento pokles tlaků je způsobený vysokým průtokem vzduchu skrz regulátor tlaku 561 012 NW 4. Je potřeba, aby model obvodu „mereni\_proporcu.mdl“ byl upraven a opětovně změřen.

## 6.2.2 Měření č. 2

Druhé měření probíhá již s upraveným regulátorem tlaku vzduchu. Ze schématu, které je zobrazeno v příloze P 13, je na první pohled zřejmý rozdíl v zapojení regulátoru tlaku vzduchu. Pro regulaci na konstantní tlak je zvolen blok PID regulace. Tento blok je vhodně nastavován v průběhu několika měření, tak aby byla regulace tlaku co nejpřesnější.

### Nastavení bloků v Matlab – Simulink

Veškeré bloky jsou shodné z předchozího měření č. 1, pouze je přidán blok **PID Controller1**. V Matlab – Simulink se otevře soubor s PID regulací „mereni\_proporcu\_PID.mdl“. Blok **PID Controller1** je zobrazen na obr. 6.2.2 – 14. Jednotlivé složky PID regulátoru se musí vhodně nastavit, zejména proporcionální eventuelně integrační složku zesílení. Tím se mění kvalita a doba regulace tlaku vzduchu. Proporcionální a integrační složka zesílení je odlaďována v průběhu několika měření.



Obr. 6.2.2-14 Nastavení PID regulace

### Spuštění experimentu

Měření probíhá obdobně jak v měření č. 1. Měření se provede pro obě strany otevření proporcionálního rozváděče. Opět se musí ručně přepojit hadička do druhého výstupu na proporcionálním rozváděči.

Nastavení jednotlivých složek PID regulátoru způsobuje rychlou dobu regulace s překmitem v počáteční fázi regulace a následné regulování kolem žádané hodnoty tlaku vzduchu. Průběh PID regulace tlaku vzduchu je patrný z grafu, který je v příloze P 4.



Grafy závislosti průtoku vzduchu na vychýlení šoupátka z přípoje 1 do 2 a 1 do 4 jsou zobrazené v příloze P 5 a P 6. Jak je zřejmé z grafů dochází opět k malé hysterezi proporcionálního rozváděče MPYE – 5. Maximální průtok proporcionálním rozváděčem je větší s použitím regulátoru tlaku vzduchu 561 012 NW4 z PID regulací proto, že už nedochází k poklesu tlaku vzduchu v průběhu měření.

### **6.2.3 Měření č. 3**

#### **Nastavení bloků v Matlab – Simulink**

Veškeré bloky jsou shodné z měření č. 1, V Matlab – Simulink se otevře soubor „mereni\_proporcu.mdl“. V modelu se nastaví nulový tlak pro proporcionální regulátor tlaku 561 012 NW 4 a také se odpojí od zdroje napájecího napětí.

#### **Spuštění experimentu**

Tento experiment je zaměřen na zkoušení ručního redukčního ventilu s manometrem LR – 1/8 – S od fy FESTO. Měření probíhá obdobně jako v předchozích dvou případech. Rozdíl je však v regulaci tlaku vzduchu, který se místo proporcionálního redukčního ventilu 561 012 NW4 použije ruční redukční ventil LR – 1/8 – S.

Pustí se přívod vzduchu ručně a nastaví se přibližná hodnota 0,26 [MPa] na ručním redukčním ventilu LR – 1/8 - S. Poté se spustí měření, které probíhá automaticky jako u předchozích měření. Po skončení měření přívodu 1 do 2 se zastaví přívod vzduchu ručně a přepojí se hadička do druhého vývodu proporcionálního rozváděče MPYE – 5 a spustí se měření pro druhý výstup proporcionálního rozváděče MPYE – 5. Po skončení experimentu se zastaví přívod vzduchu.

Jak je zřejmé z grafu, který je zobrazen v příloze P 3, ruční redukční ventil LR – 1/8 – S má obdobnou charakteristiku regulace tlaku vzduchu jako proporcionální regulátor tlaku vzduchu 561 012 NW4.

Grafy závislosti průtoku vzduchu na vychýlení šoupátka z přípoje 1 do 2 a z přípoje 1 do 4 jsou zobrazeny v příloze P 7 a P 8. Jak je zřejmé z grafu proporcionální rozváděč MPYE – 5 má opět nepatrnou hysterezi. Maximální průtok rozváděčem je obdobný jako v měření č. 1.

## 7. Závěr

Úkolem této diplomové práce je navrhnout experiment, který ověří různé vlastnosti proporcionálního řízení. V první řadě je zpracován všeobecný přehled proporcionálního řízení a srovnán s řízením klasickými prvky. V následujících kapitolách je přehled různých druhů proporcionálního řízení. Regulace proporcionálních prvků může být plně pneumatická nebo plně elektronická, ale také kombinace těchto dvou regulací. V další části této práce jsou zpracována různá pneumatická obvodová a elektrická schémata pro zapojení různých druhů proporcionálního řízení.

V kapitole č. 5 jsem si připravil veškeré pneumatické prvky, které se použijí pro následný experiment. Prvky jako jsou snímač tlaku ISE 40, průtokoměr vzduchu SD 6000, proporcionální rozváděč MPYE – 5 a elektropneumatický regulátor tlaku s proporcionálním magnetem typ 561 012 NW 4 se musely odzkoušet a odladovat v několika jednoduchých měřeních. Řízení těchto prvků se realizovalo pomocí programového vybavení Matlab – Simulink rozšířeném o Real Time Toolbox. V tomto softwaru jsou zhotoveny jednoduché modely pro snímač tlaku a průtoku vzduchu a pro řízení proporcionálních prvků.

V poslední kapitole je sestaven model v Matlab – Simulink a jsou provedena veškerá nastavení jednotlivých bloků pro řízení proporcionálních prvků. Následně je provedeno několik měření, které jsou zaznamenány a vyhodnoceny v Microsoft Office Excel.

Měření č. 1 je zaměřené na zkoušení proporcionálního rozváděče MPYE – 5, které ověří jeho hysterezi a maximální průtok vychýlení šoupátka na obě strany. Proporcionální regulátor tlaku typ 561 012 NW 4 měl za úkol udržet konstantní tlak po celou dobu měření, ale při maximálním průtoku vzduchu, je zaznamenám značný pokles tlaku vzduchu. Tento pokles tlaku je způsobený vysokým průtokem vzduchu skrz proporcionální regulátor tlaku 561 012 NW 4. Je potřeba, aby model obvodu „mereni\_proporcu.mdl“ byl upraven a opětovně změřen.

V měření č. 2 je přepracován model v Matlab – Simulink, který je rozšířen o blok PID regulaci pro proporcionální regulátor tlaku typ 561 012 NW 4, model je zobrazen v příloze P 13. PID regulace tlaku vzduchu způsobuje regulaci tlaku kolem požadované hodnoty a to i při maximálním průtoku vzduchu. Při konstantním tlaku vzduchu je dosaženo vyššího průtoku vzduchu proporcionálním rozváděčem.

Měření č. 3 je zaměřeno na srovnání regulace tlaku vzduchu, které srovnává proporcionální regulátor tlaku vzduchu typ 561 012 NW 4 s ručním redukčním ventilem LR – 1/8 – S od fy FESTO. Tímto měřením je zjištěno, že proporcionální regulátor tlaku typ 561 012 NW 4 bez PID regulace má srovnatelnou charakteristiku poklesu tlaku vzduchu s ručním redukční ventil LR – 1/8 – S.

Výsledky jednotlivých měření jsou pro názornost zobrazeny v přílohách P 1 až P 11. K diplomové práci jsou přiložené přílohy P 12 a P 13, které obsahují Modely proporcionálního řízení v Matlab – Simulink.

## 8. Použitá literatura

- [1] BEATER, P. *Pneumatic drives : system design, modelling and control*. Berlin: Springer. 2006. 323 pp. ISBN 978-3-540-69470-0.
- [2] KOPÁČEK, J. ŽÁČEK, M.: Cvičení z řízení pneumatických systémů. Skripta VŠB-TU Ostrava, 2004, 94 s. 1. vydání, ISBN 80-248-0692-4.
- [3] KOPÁČEK J.: Pneumatické mechanismy. Díl II, Řízení pneumatických systémů. Skriptum VŠB TU Ostrava, 2005. 94 s. 2 vydání, ISBN 80-248-0880-3.
- [4] NOSKIEVIČ, P.; JÁNIŠ, P. [Online]. <[http://dsp.vscht.cz/konference\\_matlab/matlab04/noskievic.pdf](http://dsp.vscht.cz/konference_matlab/matlab04/noskievic.pdf)>.
- [5] Schmid, D. Řízení a regulace pro strojírenství a mechatroniku. Praha: Europa – sobotáles, 2005. 420 s. ISBN 80-86706-10-9.
- [6] SMC TRAINING Stlačený vzduch a jeho využití, 2 vydání.
- [7] FESTO. *Katalog produktů*. [online]. Dostupné z www: <URL <http://www.festo.com>>
- [8] FLUIDTECHNIK Bohemia. Katalog produktů. [online]. Dostupné z www: <URL [www.fluidbohemia.cz/](http://www.fluidbohemia.cz/)>
- [9] SMC. *Katalog produktů*. [online]. Dostupné z www: <URL <http://www.smc.cz>>
- [10] MM Průmyslové spektrum. *Strojírenský měsíčník*. Dostupné z www: <URL <http://www.mmspektrum.com>>
- [11] *Simulace a řízení pneumatického servopohonu pomocí programu Matlab - Simulink*. <http://www.humusoft.cz/produkty/datacq/mf624/>

- [12] HUMUSOFT s.r.o. Praha. *Real Time Toolbox for use with SIMULINK. Version 4.0. User's Manual.* 2006.
- [13] HUMUSOFT s.r.o. Praha. *MF 624 Multifunction I/O Card.* User's Manual. 2006.
- [14] Firemní podklad Rexroth Mecman Pneumatik. Elektro-pneumatisches Druckregelventil Serie 561 012, NW 4, G 1/8 mit Proportionalmagnet, analog angesteuert.
- [15] Firemní podklady ifm electronic. Hlidač spotřeby tlakového vzduchu SD 6000.
- [16] Žáček, M. Měření frekvenční charakteristiky pneumatického systému, *Acta Hydraulica et Pneumatica*, 2007, (3), č. 1, s. 33 - 38. ISSN 1336-7536
- [17] FESTO Esslingen. *Bedienungsanleitung. Elektronisches Proportional-Wege-Ventil Typ MPYE*

### Poděkování

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce Ing. Miloslavovi Žáčkovi za ochotu při odborných konzultacích a za cenné připomínky, rady a podněty při tvorbě této diplomové práce.

## 9. Seznam příloh

- P 1 Závislost průtoku vzduchu na vychýlení šoupátka z přípoje 1 do 2, bez PID regulace
- P 2 Závislost průtoku vzduchu na vychýlení šoupátka z přípoje 1 do 4, bez PID regulace
- P 3 Závislost regulace tlaku a průtoku vzduchu na čase, bez PID regulace a ruční redukční ventil LR – 1/8 – S
- P 4 Závislost regulace tlaku vzduchu na čase, PID regulace
- P 5 Závislost průtoku vzduchu na vychýlení šoupátka z přípoje 1 do 2, s PID regulací
- P 6 Závislost průtoku vzduchu na vychýlení šoupátka z přípoje 1 do 4, s PID regulací
- P 7 Závislost průtoku vzduchu na vychýlení šoupátka z přípoje 1 do 2, ruční redukční ventil FESTO LR – 1/8 - S
- P 8 Závislost průtoku vzduchu na vychýlení šoupátka z přípoje 1 do 4, ruční redukční ventil FESTO LR – 1/8 - S
- P 9 Závislost průtoku vzduchu na vychýlení šoupátka
- P 10 Závislost průtoku vzduchu na čase z přípoje 1 do 2
- P 11 Závislost průtoku vzduchu na čase z přípoje 1 do 4
- P 12 Model „mereni\_proporcu.mdl“ v Matlab – Simulink
- P 13 Model „mereni\_proporcu\_PID.mdl“ v Matlab – Simulink
- P 14 Datový nosič DVD